38.

L'ACUSTICA

APPLICATA ALLA

COSTRUZIONE DELLE SALE

PER SPETTACOLI E PUBBLICHE ADUNANZE

PER L'INGEGNERE

ANTONIO FAVARO

Professore nella R. Università di Padova
Già allievo della R. Scuola d'Applicazione di Torino

(Con 43 figure nel testo)

OPERA PREMIATA PER CONCORSO
DAL
R. ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI

TORINO
TIP. E LIT. CAMILLA E BERTOLERO - EDITORI
Via Ospedale, N. 18

1882.

7. 10. 144

7.10.144

L'ACUSTICA

APPLICATA ALLA

COSTRUZIONE DELLE SALE

PER SPETTACOLI E PUBBLICHE ADUNANZE

PER L'INGEGNERE

ANTONIO FAVARO

Professore nella R. Università di Padova
Già allievo della R. Scuola d'Applicazione di Torino

(Con 43 figure nel testo)

OPERA PREMIATA PER CONCORSO
DAL
R. ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI

TORINO
TIP. E LIT. CAMILLA E BERTOLERO - EDITORI
Via Ospedale, N. 18
—
1882.

Proprietà Letteraria

L'AUTORE A CHI LEGGERÀ

Coloro, ai quali il mio povero nome non giunge del tutto nuovo, proveranno forse una qualche sorpresa nel leggerlo in fronte ad un libro che tratta le applicazioni dell'acustica all'arte architettonica, e nulla infatti era più lontano dalle mie idee quanto l'occuparmi di questo argomento, quando la gravissima questione fu proposta agli studiosi dal R. Istituto Veneto nel 1875.

Nè forse riuscirà discaro al benigno Lettore di sapere come io mi sia indotto a cercare nello studio di questo tema una distrazione dai miei prediletti lavori sulla istoria delle scienze matematiche e fisiche.

Poche cose mi trovano tanto suscettibile come le declamazioni di certi uomini pratici contro le teorie, e lo spregio col quale taluni, abbagliati dai portentosi progressi dell'età nostra, si fanno a parlare delle nozioni scientifiche possedute da coloro che in ordine di tempo ci precedettero nell'arringo degli studi. Per i primi, un profondo abisso separa la teoria dalle applicazioni: essi riguardano poco meno che quali utopisti i cultori della scienza pura, e li designano col titolo, che stimano irriverente, di « scienziati da gabinetto ». I secondi

giudicano buono soltanto quello che è nuovo, o che stimano tale: pensano che il patrimonio scientifico, lasciatoci in preziosa eredità dai nostri maggiori, sia stato già intieramente sfruttato, e quanto per avventura ne rimane di inesplorato giudicano materia da archeologi, buona soltanto ad offrir argomento alle disquisizioni accademiche di quei pazienti indagatori compassionevolmente indicati col nomignolo di « topi da biblioteca ».

L'applicazione dell'acustica alle costruzioni architettoniche, od, in altre parole, lo studio delle disposizioni da darsi agli edifizi, affinchè abbiano a trovarsi in condizioni favorevoli alla uniforme diffusione ed alla distinta percezione dei suoni in essi prodotti, offre largo campo a dimostrare quanto vadano errati tanto i primi quanto i secondi, e tostochè me n'avvidi pensai a tenere l'invito fatto dal Veneto Istituto agli studiosi ed a cimentarmi all'ardua impresa.

Qual'è oggidì lo stato della questione?

I fisici opinano di conoscere perfettamente le leggi dell'acustica: in particolar modo poi per ciò che si riferisce ad ambienti d' ogni parte limitati; ma l'architetto ne dubita, e questi dubbi trae dalla sua esperienza. Egli crede di disporre i suoi edifizi secondo quelle leggi, e tuttavia in generale il risultato corrisponde così poco alla sua aspettazione che bene spesso è perfettamente contrario a ciò ch'egli si riprometteva. E poichè egli non pone dubbio sulla esattezza colla quale ha applicate quelle leggi, così dubita delle leggi istesse, e perciò opina che il suono debba propagarsi in altro modo tuttavia sconosciuto, e secondo leggi non ancora discoperte. Di questi dubbi si hanno prove ad ogni piè sospinto: il Garnier, il celebre architetto del nuovo teatro dell'*Opéra* di Parigi, esce a dire: « jadis comme aujourd'hui la science de l'acoustique appliquée était une science puérile, et c'est le hasard seul qui dans ce cas spécial a été de tous temps le *Deus ex machina* »,

Se nelle scienze sperimentali avessero un qualche valore le autorità, queste conchiusioni sarebbero invero scoraggianti, e farebbero desistere anco i più animosi dallo studio d'una questione data addirittura come disperata; ai nostri tempi sopratutto, nei quali, per le nuove abitudini della vita sociale e politica, la questione medesima ha raggiunto un grado altissimo di importanza. Infatti, fino a trenta o quarant'anni or sono, può dirsi che in generale i soli edifizi, nei quali poteva maggiormente importare di assicurare agli astanti una perfetta audizione, erano i teatri, le chiese ed alcune grandi aule per uso della pubblica istruzione. Ma da quel tempo in poi le condizioni sono mutate; tutte le nazioni civili sono rette costituzionalmente: in ogni Stato due Camere raccolgono i rappresentanti della Nazione, i quali bene spesso sommano a parecchie centinaia: le gravissime questioni che vi si agitano, imperiosamente richiedono che a nessuno degli uditori sfugga la più esile voce degli oratori; nè basta, chè provincie e comuni sono retti da assemblee, ben sovente numerose, nelle quali si discutono argomenti non meno importanti; le associazioni politiche pur esse, per le loro radunanze, richiedono locali nei quali la voce si propaghi in modo uniforme e giunga ben distinta agli uditori; ed ancora ambienti in ottime condizioni acustiche vuole a' nostri giorni la giustizia, resa com'è dal magistrato popolare; vogliono quelle assemblee di vario genere che lo spirito d'associazione chiama spesso a raccolta, vogliono i cosiddetti conferenzieri, i concertisti e così via via.

La questione adunque non desta soltanto l'interesse degli studiosi come problema scientifico, ma altresì si impone per la importanza somma delle sue attinenze; e ne fa fede il considerevole numero di scritti finora dati alla luce a tale proposito. Senza indicarli qui ad uno ad uno, rimandiamo il Lettore alle frequentissime citazioni che ne troverà nel presente lavoro; ma non possiamo a meno dal segnalarne due,

ai quali abbiamo più frequentemente ricorso e che ci servirono di guida principale, quantunque in talune questioni le conchiusioni nostre sieno dalle loro essenzialmente diverse. Sono questi l'*Acoustics in relation to architecture and Building* di T. Roger Smith, pubblicato a Londra senza data, e l'*Acoustique et optique des salles de réunions publiques* dell'architetto T. Lachez, edita a Parigi una prima volta nel 1848 ed una seconda nel 1879. Importantissima la prima perchè porge una esatta relazione di ciò che, a proposito delle applicazioni dell'acustica, si è fatto in Inghilterra, nel paese cioè dove l'argomento venne maggiormente studiato; utilissima ancora perchè le varie questioni vi sono trattate sistematicamente con ottima distribuzione delle materie e con grande chiarezza. Di quanto questa egregia opera contiene abbiamo largamente approfittato nel presente lavoro, coordinandone i materiali con quegli altri che ci vennero somministrati da ulteriori indagini. Quanto all'opera del Lachez, sebbene in essa le varie questioni non sieno trattate colla generalità e colla copia di materiali, che costituiscono uno dei precipui pregi dello scritto dello Smith, pure deve riguardarsi come uno dei più preziosi contributi recati allo studio della questione, e deve invero deplorarsi che all'autore sia mancato un più largo campo di applicazione. Senza dubbio l'opera del Lachez meriterebbe d'essere assai più conosciuta, imperocchè mai, nè prima nè dopo di lui, le questioni, relative particolarmente alle sale destinate alle discussioni parlamentari ed al pubblico insegnamento, furono fino ad ora trattate con tanto impegno e con così piena conoscenza della materia.

Nel nostro Paese la letteratura tecnica non offriva ancora alcuno scritto nel quale le applicazioni dell'acustica all'arte architettonica fossero trattate con una certa larghezza e questo fu senza dubbio il motivo che indusse l'Istituto Veneto a bandire sull'importante tema un concorso della fondazione

Querini-Stampalia, concorso che fu vinto dal presente lavoro (*). Nel quale pertanto non deve il Lettore attendersi conchiusioni assolute; non si tratta di formule nelle quali basti sostituire certi valori per averne il risultato che si cerca; troppo vanno variando dall'uno all'altro anche gli edifizi della medesima categoria e le condizioni in cui sono da erigersi, perchè sia possibile lo stabilire una specie di sillabo ad articoli indeclinabili ed assoluti. In tutte le questioni architettoniche, ed *a fortiori* in questa, che giustamente viene in generale considerata fra le più gravi, molto deve essere lasciato all'architetto, al quale la scienza e l'arte non somministrano, e non possono somministrare, se non norme generali, ch'egli deve poi applicare con sano criterio a seconda dei casi diversi.

Quando gli architetti possano convincersi che la questione della uniforme diffusione e della distinta percezione dei suoni nelle sale destinate a spettacoli o a pubbliche radunanze è una questione scientifica come tante altre, la cui soluzione per conseguenza non può essere lasciata al caso, non v'ha dubbio alcuno che, mediante una corretta ed esatta applicazione delle norme finora meglio accertate, si completerà il corredo sperimentale, colmando quelle lacune, a motivo delle quali una piena ed intera soluzione del problema deve riguardarsi ancora come immatura.

Coloro che maggiormente progredirono in questi studi sono gli inglesi, appunto perchè furono quasi i soli che finora abbiano avuto l'ardire di ammettere la possibilità di una soluzione. E se prima di tutto non si riuscirà ad infondere negli architetti la speranza di poter assoggettare a norme più o men bene definite quelli che chiamano d'ordinario i capricci dell'acustica, non si farà alcun passo verso la meta.

(*) Credo opportuno di avvertire che, meno qualche lievissima aggiunta fatta sulle prove di stampa, questo lavoro è tale quale fu presentato al concorso, che si chiuse il 31 marzo 1881.

Se a raggiungere un tale scopo potessero in qualche misura contribuire gli elementi ed i dati adunati nel presente scritto, mi stimerei compensato ad usura della fatica durata e del tempo impiegato per raccoglierli.

Padova, 12 novembre 1881.

A. Favaro.

PARTE PRIMA

INTRODUZIONE TEORICA

§ I.

Generalità.

Acustica dicesi quel ramo della fisica che tratta delle leggi che regolano la produzione e la propagazione di certe vibrazioni dei corpi, le quali ci si rendono sensibili mediante l'organo dell'udito.

Le impressioni percepite dall'orecchio si dicono con nome generico *suoni* e si distinguono in *suoni musicali* ed in *rumori*. I primi hanno luogo quando le vibrazioni si susseguono ad intervalli regolari e con sufficiente rapidità: i secondi sono specialmente caratterizzati dalla irregolarità e dalla discontinuità delle impressioni che producono sull'orecchio, od in altre parole sono costituiti da una successione irregolare di vibrazioni.

Noi non ci proponiamo di stendere qui, neppure per sommi capi, un trattato di acustica, ma crediamo che il richiamare brevemente alcuni fra i principii fondamentali, che costituiscono le basi di questo ramo della fisica, possa utilmente introdurre alla speciale applicazione che forma lo scopo del presente lavoro.

L'architetto ha bisogno in generale di conoscere la teoria del suono, in quelle parti di essa soltanto che si riferiscono alle leggi secondo le quali esso si propaga, e ciò per essere in grado di conoscere appieno le norme che egli deve seguire nelle disposizioni da darsi ad un edifizio, affinchè esso soddisfi alle esigenze acustiche, approfittando degli espedienti che possono aiutarlo a raggiungere lo scopo ed evi-

tando gli ostacoli che eventualmente vi si possono opporre. Quando egli conosca appieno queste leggi di propagazione, la ricerca della natura del suono gli è inutile, anzi, secondo la applicazione che agli edifizi ne è fatta o proposta da alcuni fisici (1), sarebbe anche superflua per lui la conoscenza delle teorie relative alle modificazioni che il suono riceve in causa dell'eventuale stato dell'atmosfera.

I principii di acustica, i quali devono servire di base alle applicazioni che l'architetto può esser chiamato a farne alle disposizioni da darsi a chiese, a teatri, a sale per spettacoli, per letture o per adunanze numerose, possono riassumersi nelle seguenti proposizioni che qui successivamente ci facciamo ad enunciare ed a svolgere, colla scorta dei più autorevoli trattatisti (2) ed appoggiandoci sulle esperienze da essi riferite.

§ II.

Veicoli del suono.

Il suono, comunque prodotto, diventa percettibile quando vi sia un veicolo che lo conduca dal corpo nel quale si produce all'orecchio.

Il veicolo ordinario dei suoni è l'aria, però tutti i corpi sono atti a trasmetterli più o meno efficacemente.

Il suono venne da taluno definito: il movimento che a distanza diventa sensibile all'orecchio; esso sembra invero accompagnare qualsiasi specie di moto, e, quando questo sia troppo lento o troppo

---

(1) *Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler*, von J. G. Rhode, Berlin, 1800, pag. 5.

(2) Citiamo qui appresso le opere, delle quali ci siamo principalmente serviti:

Chladni. *Die Akustik.* Leipzig, 1802.

» *Neue Beiträge zur Akustik.* Leipzig, 1817.

Helmholtz. *Die Lehre von den Tonempfindungen.* Zweite Auflage, Braunschweig, 1865.

Radau. *L'Acoustique ou les phénomènes du son.* Paris, 1867.

Tyndall. *Sound. A course of eight lectures delivered at the Royal Institution of Great Britain.* London, 1868.

Blaserna. *La teoria del suono nei suoi rapporti colla musica.* Milano, 1875.

tenue per riuscire percettibile al nostro orecchio, lo diverrebbe se l'apparato auditivo fosse più perfetto, o se lo si armasse di strumenti adatti all'uopo. — Di ciò porgono luminoso esempio i suoni dovuti ai moti endogeni e resi sensibili al nostro orecchio mediante il microfono. — Questi movimenti o queste vibrazioni dei corpi si comunicano allo strato d'aria che li circonda immediatamente e da questo agli strati successivi, riprendendo essi la posizione primitiva dopo avvenuta la trasmissione del movimento.

Per tal modo ogni strato d'aria che circonda il corpo sonoro riceve il movimento dallo strato precedente e lo trasmette al susseguente sotto forma di onda e per tal maniera si propaga attraverso l'aria l'impulso sonoro. Codesto impulso può talvolta raggiungere proporzioni considerevoli: ci basterà citare l'esempio dei forti colpi di tuono che fanno tremare gli edifizi, quello degli spari d'artiglieria che talfiata spezzano le invetriate.

Lo spostamento della impulsione non deve confondersi con quello delle molecole che ad ogni istante la ricevono, poichè mentre l'onda percorre grandi distanze, le molecole d'aria non subiscono se non limitati movimenti d'andirivieni.

Una celebre esperienza (1) che, leggermente modificata, si ripete in tutti i corsi di acustica, dimostra da un lato che il suono non si propaga nel vuoto e prova nel tempo istesso che anche altri corpi oltre all'aria si prestano a tale propagazione. Consiste tale esperienza nel collocare una sveglia sotto la campana d'una macchina pneumatica: di mano in mano che si va estraendo l'aria, il suono si affievolisce e, quando il vuoto sia ottenuto con quella maggiore approssimazione che è materialmente possibile, non si percepisce più il suono della sveglia, neppure accostando l'orecchio al recipiente sotto il quale si trova, ancorchè si vegga il martello battere sulla campana della sveglia. Nell'eseguire questa esperienza pertanto, e perchè essa riesca nel miglior modo possibile, è mestieri o sospendere l'apparecchio di

---

(1) Tyndall attribuisce inesattamente questa esperienza al fisico inglese Hawksbee morto nell'anno 1713: essa risale infatti ad un'epoca di molto anteriore e certamente fu istituita nel 1615 da Giovanfrancesco Sagredo, l'amico di Galileo (Cfr. *Le opere di Galileo Galilei*. Prima edizione completa, ecc. Tomo viii, Firenze, 1851, pag. 372). Ciò che effettivamente Hawksbee provò per il primo colla esperienza si è che « le parti del corpo sonoro nel vuoto non mutano al punto da non poter più ricevere il movimento necessario per la produzione del suono ». Veggansi infatti: *The philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Vol. v, London, 1809, pag. 499.

soneria mediante fili opportunamente disposti, oppure collocarlo sopra uno strato di materie poco elastiche, poichè se la sveglia fosse posta immediatamente sopra il piatto della macchina pneumatica, le vibrazioni del corpo sonoro si comunicherebbero al piatto e da questo attraverso all'aria circostante, all'orecchio. Anzi, quando il vuoto nella campana sia spinto al massimo possibile, quel po' di suono che tuttavia si percepisse accostando l'orecchio all'apparato, sarebbe appunto condotto, o dai fili che tengono in sospensione la sveglia, o dalle materie non assolutamente prive di elasticità, sulle quali essa trovasi appoggiata.

Del rimanente qualsiasi altro corpo fluido o gazoso, sostituito all'aria nel recipiente della macchina, farebbe ricomparire le vibrazioni sonore, le quali, come risulta dall'esperienza, colpirebbero tanto più fortemente l'udito, quanto fosse maggiore la densità dei fluidi o dei corpi gazosi introdotti nella campana.

Fra le esperienze, le quali valgono a provare che il suono può essere condotto oltre che dall'aria anche da altri corpi, citeremo quelle di Hassenfratz e di Biot, che dimostrano questo fatto colla massima evidenza. Hassenfratz, disceso in uno dei sotterranei nel sottosuolo di Parigi, incaricò un assistente di battere con un martello sopra una massa di pietra costituente la parete d'una delle gallerie sotterranee: allontanandosi egli frattanto dal punto nel quale aveva luogo la percussione, e tenendo in pari tempo un orecchio applicato alla massa murale, distinse bentosto due suoni, dei quali uno era trasmesso dalla pietra e l'altro dall'aria. Biot, avendo fatto sparare una pistola ad una estremità di un sistema di tubi in ghisa della lunghezza di circa un chilometro, udì dall'altra i suoni di due colpi distinti, uno dei quali trasmesso dalla ghisa, l'altro dall'aria. Del rimanente molti e molti fatti della vita pratica concorrono a dimostrare la medesima cosa. Si sa che appoggiando l'orecchio contro il suolo si distingue nettamente il rumore del cannone, lo scalpito dei cavalli, ecc., a grandissima distanza. È noto agli ingegneri come uno dei criteri per giudicare dello stato di buona conservazione delle travi in legno consista nel grattarne una estremità con un chiodo e nel verificare se o meno il rumore per tal modo prodotto sia percettibile all'altro estremo: avvenendo perfettamente la trasmissione se non vi sia alcuna discontinuità nelle fibre del legno, riuscendo invece affievolita nel caso in cui la continuità sia rotta o dai tarli o dalla putrefazione. Per ultimo è noto che i palombari, standosene immersi nell'acqua, percepiscono più o meno distintamente i suoni prodotti sul fondo. Si dubitò dapprima che il suono, che veniva percepito malgrado la interposizione d'una certa

massa d'acqua, avesse per veicolo l'aria contenuta nel liquido, ma le esperienze di Nollet dimostrarono non esservi sensibili differenze fra i suoni prodotti dal corpo sonoro immerso nell'acqua aerata e nell'acqua privata d'aria.

In tutti questi casi però ed in altri innumerevoli che potrebbero citarsi, l'aria e l'acqua figurano pur sempre come veicoli del suono, poichè, qualunque sia il corpo che si presta alla trasmissione del suono, il movimento sonoro si comunica al nervo acustico (attraverso il padiglione dell'orecchio o attraverso la bocca mediante la tromba di Eustachio), mercè l'aria contenuta nella cassa del timpano ■ mercè l'acqua contenuta nel labirinto, acqua nella quale galleggiano le fibre terminali del nervo acustico.

Noi quindi possiamo conchiudere: le vibrazioni di un corpo sonoro si comunicano a tutte le materie contigue immediatamente o mediatamente; condizione necessaria perchè un suono riesca percettibile si è che esista una continuazione di materia qualunque fra il corpo vibrante e l'organo dell'udito; l'aria atmosferica è la materia per mezzo della quale si trasmettono i suoni al nostro orecchio, ma tutte le materie fluide o solide si prestano al medesimo ufficio.

Avvertiamo però subito, con riserva di tornare in seguito sullo stesso argomento, che non tutti i corpi sono atti a trasmettere i suoni con eguale efficacia. Nel riportare la esperienza, colla quale si dimostra che il suono non si propaga nel vuoto, noi abbiamo supposto adagiata la sveglia sopra uno strato di materie dotate di poca elasticità allo scopo di impedire che le vibrazioni del corpo sonoro si comunicassero al piatto della macchina pneumatica e di là attraverso all'aria circostante fino all'orecchio dello sperimentatore. In generale i corpi non elastici o dotati di debole elasticità, i corpi molli sono cattivi veicoli del suono: tali sono le stoffe, la stoppa, la cera, l'argilla alquanto umida, ecc. Così, per modo di esempio, un ricco cortinaggio steso attraverso il vano di una porta impedisce di udire in una stanza le parole pronunziate in quella attigua assai più che non faccia semplicemente la porta chiusa. Le materie finamente divise si prestano pure assai imperfettamente alla trasmissione del suono. Così, per modo d'esempio, è noto agli ingegneri che uno degli espedienti più opportuni a togliere la sonorità dei solai metallici consiste nel riempierne i vani con segature di legno, calcinacci polverizzati, ecc.

§ III.

Propagazione del suono. Riflessione. Rifrazione. Inflessione. Condotta. Assorbimento.

Il suono si propaga in tutti i sensi a partire dal luogo dove lo si genera, diviene sempre più debole di mano in mano che si allontana dal centro di produzione e finisce per non essere più percettibile.

Il suono può essere riflesso, rifratto, inflesso, condotto ed assorbito.

La esperienza insegna che il suono si propaga con moto uniforme a partire dal punto dove lo si genera (centro fonico) da tutte le parti, come dal centro alla superficie d'una sfera e che questa propagazione si effettua mediante uno scuotimento dell'aria.

La massa d'aria messa in vibrazione va così aumentando mano a mano che il suono si propaga ed è evidente che ciò non può avvenire senza che il movimento propagato non ne rimanga affievolito. Supponiamo infatti un centro fonico: esso farà vibrare l'aria tutto intorno ed il suono si propagherà sopra superficie sferiche concentriche aventi per centro quello fonico. Consideriamo ora il suono sopra una di queste superficie: esso avrà una certa intensità nei singoli punti di questa: se lo consideriamo sopra un'altra superficie sferica concentrica, ma di raggio maggiore di quello della precedente e quindi più estesa, essendo sempre la medesima quantità di suono che mette in vibrazione l'aria di questa superficie, è chiaro che nei singoli punti di essa, il suono sarà tanto meno intenso, quanto più estesa è la superficie. Dunque la intensità del suono è in ragione inversa delle superficie sferiche concentriche sulle quali si propaga: ma queste stanno fra loro come i quadrati dei raggi o delle distanze loro dal centro fonico, ne segue quindi che l'intensità del suono è in ragione inversa dei quadrati delle distanze.

Se ora noi ci facciamo ad esaminare il modo di comportarsi d'una molecola d'aria sotto l'azione di un'onda sonora, riconosciamo che al primo momento essa viene spinta contro la molecola vicina con un mo-

vimento dapprima accelerato e che poi rallenta per ciò che la forza che le comunica l'impulsione incontra nell'elasticità dell'aria una forza ad essa contraria che finisce per arrestare la molecola e per farla retrocedere.

Così passando le cose, vi sarà un certo punto nel movimento, nel quale la velocità raggiunge un massimo: or bene la intensità del suono è proporzionale al quadrato di questa velocità massima. Chiamando ampiezza della vibrazione lo spazio percorso dalla molecola d'aria nel suo movimento d'andirivieni o nell'atto della trasmissione dell'onda, può dirsi anche che l'intensità del suono è proporzionale al quadrato di questa ampiezza.

L'affievolimento del suono non avrebbe più luogo nella proporzione anzidetta se l'onda sonora si propagasse in condizioni tali da non permettere la diffusione laterale, come accade allorchè il suono viene trasmesso attraverso un tubo internamente liscio. Non crediamo però necessario allo scopo nostro l'addentrarci in ulteriori considerazioni a questo proposito, contentandoci per ora di questo semplice cenno.

Trattenendoci piuttosto a studiare la propagazione del suono in genere, porremo in evidenza come due sieno le condizioni che determinano essenzialmente la velocità dell'onda sonora, vale a dire l'elasticità e la densità del mezzo fluido che essa attraversa. Quando la pressione alla quale è sottoposto il mezzo, e per conseguenza la sua elasticità, non variano, la velocità del suono è in ragione inversa della densità del mezzo fluido; se al contrario varia la pressione senza che muti la densità, è l'elasticità quella che varia, e la velocità del suono è tanto maggiore quanto lo è questa elasticità. Newton diede per il primo una dimostrazione teorica di questi principi che noi ci siamo contentati di enunciare senza formularli rigorosamente. Nell'aria atmosferica la pressione e la densità variano nel medesimo rapporto, se tuttavia la temperatura rimanga costante, e la velocità del suono non varia che colla temperatura. L'esperienza conferma questa previsione della teoria.

Risulta di qui che, per essere comparabili, i risultati delle diverse esperienze istituite dai fisici sulla velocità del suono nell'atmosfera devono essere ricondotte ad una medesima temperatura: occorre pure una correzione relativa allo stato igrometrico dell'aria. Si è d'accordo nel ridurre la velocità osservata a quella che avrebbe il suono all'aria secca ed a 0° C.

Reciprocamente, essendo data la velocità del suono in queste circostanze, può trovarsi quella che avrebbe ad una temperatura qualunque.

Discutendo le condizioni delle diverse esperienze, Le Roux calcolò il quadro seguente della velocità del suono a 0° per minuto secondo:

1738.	Accademia delle Scienze di Parigi	m.	332,00
1811.	Benzemberg	»	332,33
1821.	Goldingham	»	331,10
1822.	Bureau des Longitudes	»	330,64
1822.	Stampfer et de Myrbach	»	332,44
1823.	Moll e Van Beek	»	332,25
1844.	Bravais e Martins	»	332,37

Cinque sopra sette di queste esperienze danno press'a poco 332 metri per la velocità di propagazione del suono: le due altre somministrano una cifra alquanto inferiore. La differenza di m. 1,80 fra i risultati più divergenti nulla ha di straordinario, e può spiegarsi colle probabili differenze delle condizioni in cui si trovavano gli strati d'aria intermedii attraversati dal suono, nel momento in cui si facevano le esperienze, poichè le osservazioni sulla temperatura non risguardano che i punti estremi.

Di qui e da altre esperienze istituite in proposito noi assumeremo adunque che la velocità del suono nell'aria è di 332 metri al secondo, alla temperatura del ghiaccio fondente; che a temperatura più bassa è minore, a più alta, maggiore, avendosi all'incirca un aumento di sessanta centimetri per ogni grado di temperatura.

Sotto la medesima pressione, vale a dire a pari elasticità, la densità dell'idrogeno è molto minore di quella dell'aria e quindi la velocità del suono nel gas idrogeno supera considerevolmente quella nell'aria. Il contrario avviene per il gas acido carbonico più denso dell'aria.

Comunemente si ritiene che la velocità del suono nell'aria aumenti colla densità di questa: ciò è erroneo, essa non dipende isolatamente nè dalla densità, nè dall'elasticità, ma bensì dal rapporto che passa fra loro. Che se realmente nei liquidi e nei solidi, come risulta dall'esperienza, la velocità del suono è maggiore che non nei gas, questo deriva appunto in forza della loro elasticità grandissima relativamente alla densità loro.

Noi possiamo compendiare i risultati ai quali siamo pervenuti sotto la forma seguente:

Chiamando con s la velocità di propagazione del suono, con D la densità del mezzo e con E il coefficiente di elasticità si avrà in generale:

$$s = \sqrt{\frac{E}{D}}$$

Per l'aria o per qualunque gas, deve intendersi per E il rapporto fra l'incremento di pressione e la compressione corrispondente, vale a dire, se P e P+p denotano rispettivamente le pressioni iniziale e finale e V, V−v i volumi iniziale e finale, p e v essendo piccoli in confronto di P e V, si ha:

$$E=\frac{\frac{p}{v}}{\frac{V}{V}}=p\frac{V}{v}$$

se la compressione ha luogo a temperatura costante si avrebbe:

$$\frac{p}{P}=\frac{v}{V} \text{ ed } E=P$$

ma ammettendo che nella propagazione del suono la compressione abbia luogo così rapidamente da non lasciar tempo a disperdimenti di una parte sensibile del calore di compressione, si ha:

$$\frac{p}{P}=\gamma\frac{v}{V}, \qquad E=\gamma P, \qquad s=\sqrt{\frac{\gamma P}{D}}$$

dove γ=1,41 per l'aria secca, ossigeno, nitrogeno ed idrogeno.

Il valore di $\frac{P}{D}$ per l'aria secca a t^{o} è:

$$(1+0{,}00366t)\times 7{,}838\times 10^{5}$$

di qui la velocità del suono attraverso l'aria secca è:

$$s=10^{4}\sqrt{1{,}41\times(1+0{,}00366t)\times 7{,}838}$$
$$=33240\sqrt{1+0{,}00366t}$$

ovvero approssimativamente per le temperature atmosferiche:

$$s=33240+60t$$

Nel suo modo di propagazione il suono presenta molta analogia con quello tenuto dalla luce e dal calorico raggiante, e, ciò che per noi presenta un particolare interesse, tutti i fatti che si manifestano nella riflessione della luce hanno i loro analoghi nella riflessione del suono. Un' onda sonora si propaga regolarmente e colla forma che è propria finchè sta nel medesimo mezzo, ma, giunta alla super-

ficie che separa questo mezzo da un altro di diversa densità od elasticità, viene parzialmente o totalmente riflessa, secondo i casi, e rimbalza, precisamente come avviene dei corpi elastici lanciati contro un piano resistente. Sia MN (fig. 1) normale alla superficie contro la quale si riflette il suono nel punto M in cui si considera avvenire l'urto dell'onda sonora, l'angolo AMN che la direzione del suono verso quel punto della superficie forma con questa normale, chiamasi *angolo d'incidenza* e l'angolo NMB formato colla medesima normale dal suono riflesso chiamasi *angolo di riflessione.*

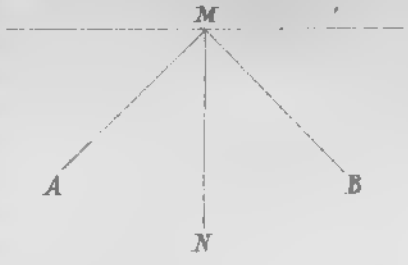


Fig. 1.

Ciò premesso, la legge della riflessione dei suoni si enuncia: *L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza e questi due angoli giacciono nel medesimo piano.* Questa legge si dimostra sperimentalmente col far riflettere il suono sopra specchi piani o curvi, ed il Tyndall, ricorrendo all'uso delle fiamme sensibili, giunse anche a rendere visibili i fenomeni della riflessione (1).

Questo argomento della riflessione del suono è di così grande importanza per la applicazione che noi ci proponiamo di studiare, da meritare che noi entriamo a tale proposito in alcuni ulteriori particolari.

Se noi supponiamo che il centro fonico A si avvicini alla normale

---

(1) *On the Atmosphere as a Vehicle of Sound.* By JOHN TYNDALL. Nei *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, for the year MDCCCLXXIV. Vol. 164. Part 1. London MDCCCLXXIV, pag. 183. — *Sur le mouvement et la sensation du son.* Actualités scientifiques pubblièes par M. l'Abbé MOIGNO. Première Série, N° 46. Paris, 1875, pag. 36-42. — È ben noto che questi studi particolari di acustica furono compiuti dal TYNDALL nell'occasione in cui attendeva per incarico del Trinity-House alla ricerca del miglior sistema di segnali marittimi. Tali studi pertanto non portarono se non sulla trasmissione del suono attraverso l'aria. Impressionati tuttavia dal fatto messo in evidenza dalle esperienze del COLLADON, che cioè, mediante il cornetto da lui adoperato, il rumore prodotto da una barca che leva l'àncora era percettibile a quattro chilometri di distanza, vogliamo qui esprimere la idea che forse sarebbe possibile di trasmettere attraverso l'acqua un suono molto intenso il quale potrebbe quindi servire come segnale marittimo a venire avvertito da un marinaio di guardia che tenesse l'orecchio applicato contro un cornetto della forma di quello adoperato dal COLLADON nella occasione delle esperienze da lui eseguite sul lago di Ginevra.

MN, altrettanto accadrà del punto B e questi due punti A e B verranno a coincidere allorchè il suono proceda nella direzione della normale medesima. Il suono che parte da N e che incontra la superficie resistente nella direzione della perpendicolare NM, ritorna per il cammino medesimo da M in N verso l'origine. Allorquando vi sia un intervallo sufficiente fra il suono diretto e il suono riflesso, questo diventa un *eco*. Supponiamo dapprima che non vi sia se non una sola superficie riflettente. Se l'osservatore vuol sentire l'eco della propria voce, è mestieri ch'egli si collochi sulla MN normale alla superficie riflettente: s'egli vuol sentire l'eco d'un suono prodotto in A egli deve collocarsi in un punto B simmetrico rapporto ad MN. Ora, siccome il suono riflesso si propaga colla medesima velocità del suono diretto, così prima di sentire il suono riflesso che percorre la spezzata AMB, egli sentirà necessariamente il suono che arriva direttamente da A a B: ciò, bene inteso, nella ipotesi che nessun ostacolo impedisca la trasmissione del suono da A a B. L'osservatore udrà adunque in generale due suoni successivi ch'egli potrà distinguere uno dall'altro se il primo abbia cessato di farsi sentire al momento in cui arriva il secondo. Tale condizione, che deve essere soddisfatta perchè l'eco riesca distinto, dipende evidentemente dalla distanza dell'ostacolo che riflette il suono.

Cominciamo dal considerare il caso in cui il suono ritorni al punto di partenza. L'osservatore essendo situato in N alla debita distanza dalla superficie riflettente, udirà prima la propria voce nel momento stesso in cui la emette, poi di bel nuovo dopochè il suono avrà percorso due volte la distanza MN.

Ora per pronunziare un suono distinto od una sillaba si richiede almeno un decimo di secondo (1), se quindi l'osservatore pronunzi parecchie sillabe o emetta diversi suoni e l'ostacolo sia ad esso troppo

---

(1) Notiamo che alcuni autori vogliono che la pronunzia d'un suono articolato esiga un tempo doppio di quello voluto per un suono qualunque: e ciò infatti è conforme alla esperienza che ognuno può ripetere da sè. Di tale circostanza si terrà conto nel caso in cui sia da evitarsi un determinato eco: qui tuttavia abbiamo creduto opportuno di considerare cumulativamente i due casi, non trattandosi di applicazione, ma semplicemente di porgere una spiegazione del fenomeno. — Interessantissimi studi a tale proposito furono istituiti da W. H. Barlow, che ne consegnò i risultati in una memoria intitolata: « *On the Pneumatic Action which accompanies the Articulation of Sounds by the Human Voice, as exhibited by a Recording Instrument* », inserita nei *Proceedings of the Royal Society* di Londra. Vol. XXII, N. 152, pag. 277-286.

vicino, la prima sillaba ritornerà prima ch'egli abbia pronunziata l'ultima e ne seguirà una confusione del suono diretto col riflesso, la quale non permetterà di udire se non l'eco delle ultime sillabe od anche nulla affatto. Infatti alla nostra temperatura ordinaria il suono percorre in un minuto secondo circa 340 metri quindi in un decimo di secondo metri 34: ora un ostacolo distante 17 metri in linea retta rimanderà il suono dopo un decimo di secondo, cosicchè questa distanza basterà per ottenere la ripetizione di una sillaba. Per pronunziare questa sillaba si richiese un decimo di secondo: nell'istante in cui si finisce di pronunziarla, il principio di essa ha avuto il tempo di tornare, poichè il suono impiega un decimo di secondo a percorrere due volte i 17 metri, il rimanente ritorna poi nell'ordine nel quale venne pronunziato ed in capo ad un nuovo decimo di secondo il ritorno della sillaba è compiuto. Se l'ostacolo dista meno di 17 metri, il suono diretto e quello riflesso si confondono, se invece la distanza è maggiore passerà un tempo più o meno lungo fra la fine della sillaba articolata e l'eco che la ripete.

Quanto si è detto riguardo all'eco monosillabo si applica immediatamente agli echi polisillabi: il principio è sempre lo stesso, è mestieri cioè che la distanza sia sufficiente per permettere al suono d'andare e tornare durante il tempo impiegato a pronunziare la frase che l'eco deve ripetere.

Fin qui si è sempre supposto che l'osservatore oda l'eco d'un suono, che egli stesso produce e che per il fatto della riflessione torna al suo punto di partenza. Le stesse deduzioni sono tuttavia applicabili al caso in cui il suono sia prodotto ad una certa distanza dall'osservatore. Così, p. e., se questi sia in B ed il suono venga generato in A, la differenza fra il cammino diretto AB e l'indiretto AMB rappresenta l'anticipazione del suono direttamente trasmesso.

Il suono, come del rimanente anche la luce (1), può subire parecchie riflessioni successive; ma, come la luce si affievolisce riflettendosi, così gli echi successivi divengono sempre più deboli. Nei paesi di montagna questa ripetizione con indebolimenti graduati del suono produce effetti sorprendenti.

---

(1) Sulla affinità delle sensazioni della vista e dell'udito veggasi quanto ne scrive il GURNEY nel suo dotto lavoro intitolato: *The power of Sound*. London, 1880, pag. 25 e seg. — Ed ai riguardi sperimentali la nota del COTTRELL intitolata: *On the Division of a Sound-Wave by a Layer of Flame or heated Gas into a reflected and a transmitted Wave*, inserita nei *Proceedings of the Royal Society* di Londra, Vol. XXII, N. 150, pag. 190-191.

Questi echi possono anche prodursi artificialmente, quando si dispongano più ostacoli collocati a distanze diverse e che agiscono sia isolatamente, sia collettivamente, rimandandosi il suono per mezzo di successive riflessioni. Le nubi pure riflettono il suono ▪ non solo le nubi, ma altresì in una atmosfera di perfetta trasparenza ottica possono presentarsi, per servirci della frase di Tyndall, delle *nubi acustiche impermeabili* (1) capaci di riflettere il suono. Non ci arresteremo su questo argomento che non entra direttamente nel quadro del nostro lavoro.

Noi avremo motivo di ritornare più innanzi sull'argomento delle successive riflessioni del suono: in via di conchiusione aggiungeremo qui che ricerche assai curiose vennero istituite a tale proposito dal P. Kircher in un'opera speciale (2), nella quale, fra le altre cose, egli si propose anco il problema di costruire un sistema capace di dare un *eco eterofono*, vale a dire una tale disposizione di ostacoli che l'eco risponda frasi diverse da quelle pronunziate: egli asserì inoltre in tale occasione la possibilità di utilizzare gli echi di una chiesa in modo da potersene servire per aumentare l'intensità dei canti ed anzi egli enuncia a tale proposito il problema seguente: ▪ *Chorum alicujus ecclesiae construere eo artificio ut tres Cantores tantum praesteni quantum centum* » (3). Il Kircher offre nella soluzione di detto problema parecchi esempi di frasi musicali composte all'uopo ed aggiunge che le chiese di S. Pietro e di S. Giacomo degli Incurabili a Roma offrirebbero disposizioni assai favorevoli all'attuazione di questo artifizio, della cui efficacia ci permettiamo di dubitare.

Crediamo tuttavia opportuno di notare qui il caso di riflessioni molteplici che si presenta nel famoso Battistero di Pisa, edifizio sormontato da una specie di cupola stretta ▪ di forma singolare. Collocandosi sotto la cupola nell'interno del battistero ed emettendo una nota, il suono si prolunga per un tempo molto lungo, per cui cantando successivamente tre o quattro note in cadenza, si ode, per effetto

---

(1) *La trasparence et l'opacité acoustique de l'atmosphère* (Leçon faite à Royal Institution). Actualités scientifiques publiées par M. l'Abbé Moigno. Première Série, n° 46. Paris, 1875, pag. 17.

(2) Athanasii Kircheri. *Phonurgia nova sive conjugium Mechanico-physicum Artis & Naturae paranympha Phonosophia concinnatum*, ecc. Campidonae M.DC.LXXII. Veggasi in particolare la sezione seconda così intitolata « *Architectura Echonica idest de Echonibus artificiose constituendis, necnon miris fabricarum Echonicarum effectibus* ».

(3) *Op. cit.*, pag. 49-50.

della riflessione, un accordo bellissimo che par di organo che si prolunga notevolmente.

Un'altra analogia assai importante fra il suono e la luce consiste in ciò, che, come la luce, anche il suono si rifrange passando da un mezzo in cui procede con una certa velocità, in un altro nel quale proceda con velocità differente: e precisamente la rifrazione avviene in modo che la direzione del suono si avvicina alla superficie di separazione dei due mezzi se la velocità del secondo mezzo è minore, e se ne allontana nel caso contrario. Avviene infatti che la direzione rettilinea secondo la quale procede il suono nel secondo mezzo non è più la stessa come nel primo, quasi come se alla superficie di separazione dei due mezzi i raggi sonori si frangessero per piegarsi alquanto.

Ecco pertanto come il Sondhaus (1) pose fuori di dubbio la esistenza di queste deviazioni.

Avendo formato con delle membrane di collodio un sacco in forma di lente biconvessa, egli lo riempì di gas acido carbonico, nel quale la velocità del suono è minore che non nell'aria. I raggi sonori, che incontrano la superficie sferica convessa della lente, si rifrangono passando attraverso il gaz, e, uscendo dalla superficie opposta, devono andare a convergere in un punto unico o fuoco. E infatti se si colloca un orologio sull'asse della lente, si riconosce esservi dall'altra parte della lente sull'asse medesimo un punto nel quale il battito dell'orologio si sente distintamente e meglio che in qualsivoglia altro punto. Vi ha dunque evidentemente convergenza di onde sonore verso questo punto e quindi rifrazione del suono. Una lente biconcava che fosse riempita di gaz idrogeno permetterebbe di constatare ugualmente il fenomeno della rifrazione del suono. Abbiamo infatti notato che la velocità del suono nell'idrogeno è maggiore che non nell'aria: le superficie concave di separazione dei due mezzi produrrebbero quindi lo stesso effetto sulla direzione dei raggi sonori e li devierebbero nel modo stesso della lente biconvessa ripiena di gaz acido carbonico.

In un solo caso la rifrazione non ha luogo ed è quando l'onda sonora cade normalmente sopra la superficie di separazione dei due mezzi, cioè quando l'angolo di incidenza è nullo. Allorchè un suono raggiunge la superficie che separa il mezzo in cui esso cammina, da un altro

---

(1) *Über die Refraction des Schalles*, negli *Annalen der Physik und Chemie* herausgegeben zu Berlin von J. C. Poggendorff. Fünf und achtzigster Band, ecc. Leipzig, 1852.

mezzo, le molecole vibranti del primo urtano contro quelle del secondo ed il movimento vibratorio in parte si comunica alle molecole del secondo mezzo ed in parte retrocede. Quindi il suono che arriva a quella superficie dividesi naturalmente in due parti: una continua a camminare nel secondo mezzo rifrangendosi all'ingresso, l'altra retrocede riflettendosi. Supponendo che in questo fenomeno non avvenga trasformazione di movimento, vale a dire supponendo che dopo l'urto tutto il movimento risultante sia ancora sonoro, è chiaro che la somma delle forze vive dei movimenti rifratto e riflesso sarà eguale alla forza viva del movimento incidente, e che i due suoni rifratto e riflesso saranno complementari l'uno dell'altro. Quindi quanto maggiore sarà il suono rifratto, tanto minore sarà il riflesso e viceversa. Ciò spiega perchè non tutte le superficie riflettenti sieno atte a produrre in egual modo l'eco.

Oltre ad essere riflesse e rifratte le onde sonore possono ancora essere inflesse. È infatti provato dalla esperienza che quando un'onda sonora nel propagarsi incontra un ostacolo, tende a girare intorno ad esso ed al di là l'intensità del suono è minore, per modo che l'ostacolo produce, come scrive il Tyndall, un' ombra parziale di suono. Il medesimo fisico riporta alcune circostanze che accompagnarono la terribile esplosione d'un magazzino di polvere pirica, avvenuta ad Erith nel 1864. Il villaggio di Erith dista di alcune miglia dalla polveriera, eppure pressochè tutti i vetri delle finestre delle case caddero in frantumi e si osservò che le finestre rivolte dalla parte opposta al centro della esplosione ebbero a soffrire quasi altrettanto di quelle che vi erano di fronte. Nella chiesa di Erith le finestre erano ad intelaiatura di piombo e la flessibilità di questo metallo permise ai vetri di cedere alla pressione senza troppe fratture; ora, tutte le invetriate della chiesa, tanto quelle di fronte come quelle di dietro, si trovarono spinte verso l'interno, la qual cosa si spiega facilmente come appresso. L'onda sonora, giunta alla chiesa, si divise in due parti che passarono l'una a destra e l'altra a sinistra: durante un istante l'edifizio subì la stretta d'una cintura d'aria fortemente compressa e la superficie flessibile delle finestre assunse una curvatura dall' infuori all'indentro. Senza dubbio, dopo quest'istante di compressione, l'aria interna dovette reagire e tendere al raddrizzamento delle superficie inflesse, ma la sua compressione essendo stata debole relativamente a quella dell'aria esterna, l'effetto della reazione restò assai limitato in confronto dell'effetto dell'urto diretto e ad ogni modo fu impotente a ricondurre le invetriate allo stato primitivo.

Oltre ai fenomeni che si presentano nella propagazione del suono e dei quali abbiamo finora tenuto parola, sonvene altri ancora i quali offrono un notevole interesse nello scopo dell'applicazione che ci proponiamo di studiare: il suono cioè può essere in date condizioni *condotto* ed *assorbito*. Di questi fenomeni non si occupano sotto un certo punto di vista e colla dovuta estensione i trattati di fisica, ed è perciò appunto che noi giudichiamo opportuno di entrare, a tale proposito, in maggiori particolari.

È evidente, scrive l'Herschel (1), senza entrare in considerazioni teoriche, che un impulso meccanico di natura qualsiasi, impresso ad un volume d'aria o di qualsiasi altro mezzo fluido o solido e di qui comunicato alle parti circostanti, quando gli sia permesso di espandersi in tutte le direzioni come da un centro, andrà propagandosi con una energia che va sempre più diminuendo, e ciò perchè la medesima forza viva è successivamente comunicata a masse sempre maggiori di materia inerte; ma se non gli si conceda che di espandersi in certe direzioni, la sua diminuzione sarà tanto meno rapida quanto meno rapidamente cresce la quantità di materia messa successivamente in movimento. Di qui segue, come naturale conseguenza, che un suono propagandosi perderà assai meno della sua intensità quando sia condotto lungo un muro che non all'aria aperta, poichè il muro ed il terreno verranno a funzionare in certo qual modo come due pareti d'un condotto.

Il Cavalieri nel suo *Specchio Ustorio* (2) nota il fatto scrivendo: « So che scorrendo la voce sopra d'una tersa superficie, senza interrompimento alcuno, suol farsi sentire più gagliarda dell'ordinario, come si sente lungo un fiume che sia placido, ovvero un muro che sia ben pulito, o da angolo ad angolo, come nella sala del Serenissimo duca di Mantova » (3).

---

(1) *Encyclopedia Metropolitana* all'articolo « *Sound* ».

(2) *Lo Specchio Ustorio overo Trattato delle Settioni Coniche, ed alcuni loro mirabili effetti intorno al lume, caldo, freddo, suono e moto ancora*, ecc. di F. Bonaventura Cavalieri, ecc. Bologna, 1632, pag. 132-133.

(3) « La sala detta de' Giganti nel palazzo ducale del Te presso Mantova, o l'altra del famoso palazzo di Caprarola. Di queste sale parlanti tratta il Bartoli nell'opuscolo de' tremori armonici e ne tratta al solito secondo le antiche dottrine peripatetiche, quasi a dispetto della nuova scuola galileiana, alla luce della quale che da ogni parte erompeva credeva suo debito chiudere gli occhi ». Così il Caverni nei suoi *Problemi naturali di Galileo Galilei e di altri autori della sua scuola*. Firenze 1874, pag. 230.

Sulla influenza poi che sulla condotta del suono può esercitare la scabrosità delle pareti, abbiamo una importante osservazione di Noël Regnault. Egli racconta infatti che nelle fogne di Parigi a grande sezione, si ha l'abitudine di impartire ordini agli operai servendosi del suono d'una trombetta e che si riconobbe che questi segnali portano incomparabilmente a maggiore distanza nelle gallerie le cui pareti sono ricoperte da un cemento ben liscio che non in quelle nelle quali la muratura è priva di rivestimento.

Come esempio della condotta del suono ad una considerevole distanza è da ricordarsi la famosa « Whispering Gallery » di S. Paolo di Londra, dove un bisbiglio pronunciato colla faccia vôlta verso la muraglia in un punto qualunque, è condotto in pari tempo in due opposte direzioni lungo la superficie levigata dell'interno del tamburo circolare sotto la cupola. I due suoni condotti, dopo aver percorso metà della galleria, arrivano nel medesimo istante al punto di facciata a quello nel quale il suono venne generato, ed ivi si percepisce un suono di intensità doppia che non in qualsiasi altro punto del circuito. La battuta di un orologio collocato contro il muro in un punto qualunque della galleria si ode distintamente alla estremità opposta del diametro. Questo fenomeno fu ripetutamente, ma erroneamente, attribuito alla riflessione, come pose già in evidenza il Saunders (1).

Hutton (2) racconta che lungo il muro d'un giardino di Kingston due persone che parlavano a voce bassissima si sentivano perfettamente a sessanta metri di distanza. Lo stesso Hutton constatò che una persona che leggeva ad alta voce era udita sul Tamigi ad una distanza di trentasei metri, mentre a terra la voce non riusciva percettibile che alla distanza di ventitrè.

Hassenfratz (3) collocò un orologio da tasca all' estremità di una canaletta formata da due tavole unite ad angolo e potè sentirne la battuta ad una distanza di venticinque passi, mentre all'aria libera egli cessava di sentirla a due passi di distanza.

All'Osservatorio di Parigi vi è una sala esagona i cui angoli opposti sono riuniti da una specie di scanalatura che percorre la vôlta: or bene, due persone collocate a due angoli opposti possono conversare a voce bassa senza essere udite da altre persone che si trovino in altri punti della sala.

---

(1) *A Treatise on Theatres* by GEORGE SAUNDERS. London, 1790.
(2) HUTTON. *Mathematical Dictionary* all'articolo « *Whispering places* ».
(3) *Journal de Physique et Chimie*. Vol. LIX.

Gli effetti dei così detti *gabinetti parlanti* dipendono dalle medesime cause e spesso sono da attribuirsi ad una disposizione affatto casuale delle pareti. Un esempio assai curioso di tale fenomeno è offerto dal cosidetto *orecchio di Dionigi*, del quale una descrizione assai particolareggiata è data dal Kircher (1), che asserisce di averlo visitato nel 1638. Oggidì trovasi ostruito.

Che questi fenomeni sieno da attribuirsi alla riflessione crediamo di poter assolutamente escludere, non trovando nell'applicazione delle leggi che la regolano, una spiegazione soddisfacente dei fatti avvertiti (2). Eppure, volendo in qualche modo spiegare questo fenomeno della condotta del suono, senza avere la pretesa di formulare delle teorie, ci pare che la seguente argomentazione possa in qualche modo rendere ragione di buona parte dei fenomeni testè registrati.

L'aria non è soltanto il semplice e prezioso veicolo dei suoni: essa stessa è un corpo eminentemente sonoro, capace di somministrare da solo, ma in date circostanze, tutti i suoni più svariati dal fischio più acuto fino all'organo più grave: tutti gl'istrumenti a vento dimostrando l'immensa sonorità del fluido aereo. L'aria, entrando in vibrazioni regolate, produce non solo dei suoni apprezzabili ed appartenenti alla scala musicale, ma più sovente dà luogo a suoni particolari che appariscono diversi dai precedenti soltanto per ciò che sono più deboli, sempre multipli, ciò che impedisce di valutarli. Gli spazi più o meno ristretti, limitati soltanto in parte o da tutte le parti, divengono come grandi strumenti a vento: l'aria che vi si trova contenuta entra in iscuotimenti regolati e vibra di vibrazioni sue pro-

---

(1) *Op. cit.*, pag. 82-85. — Leggendo questa descrizione, che si ha ogni ragione di credere veritiera, si presenta spontaneo il quesito se cioè al difettoso odierno sistema di sorvegliare i carcerati e che consiste puramente e semplicemente in un finestrino praticato nella porta, non sarebbe desiderabile si trovasse modo di sostituirne uno fondato sulle leggi della acustica, che trasformerebbe essenzialmente la disposizione delle carceri. Infatti mentre il metodo ordinario non permette di sorvegliare il carcerato se non gettando di quando in quando una occhiata nella cella, che non arriva mai improvvisa, preannunziata com'è dal rumore della voce, o dei passi, o delle chiavi, il metodo acustico opportunamente combinato con quello attualmente in vigore permetterebbe di esercitare una sorveglianza continua, in modo che nessun rumore possa prodursi nella cella senza che un guardiano ne sia avvertito. La rottura di muri, di inferriate, ecc. dovrebbe per tal modo rendersi impossibile.

(2) Veggansi a questo proposito le bellissime considerazioni istituite dal Cavalieri nello *Specchio Ustorio* già citato, pag. 133.

prie, che si dispongono e si modificano a seconda dei luoghi e della estensione loro, lasciandosi d'altronde influenzare dalle pareti colle quali sono a contatto. Così, nella esperienza di Hassenfratz, poc'anzi menzionata, l'aria contenuta fra due pareti soltanto e libera dalla parte opposta si comporta già come un corpo sonoro; non solo essa trasporta un suono con maggior facilità che non faccia quand'è interamente libera, ma lo trasporta in modo particolare che prova possedere essa medesima delle vibrazioni sue proprie. In altre parole, l'aria nello spazio vibra delle vibrazioni che trasmette, ma l'aria, per quanto poco limitata, forma un corpo in qualche modo separato dalla massa ambiente od almeno separato sufficientemente da costituire un corpo vibrante che si comporta allora come un corpo solido. È facile d'altronde concepire che un tenue scuotimento, prodotto sopra una grande massa più o meno estesa, sarà insensibile, mentre agirà invece ed assai sensibilmente sopra una massa comparativamente minima e vi determinerà delle ondulazioni regolari e sonore.

Qui sarebbe il luogo di entrare in particolari intorno al modo nel quale si comporta il suono condotto per tubi, ma ricordando che noi non iscriviamo un trattato di acustica, ma semplicemente un riassunto delle nozioni di questo ramo della fisica maggiormente importanti per l'ingegnere, ci limiteremo a pochissime cose essenziali per lo scopo nostro.

Se una colonna d'aria in un tubo, chiuso ad uno degli estremi, riceva un impulso che la metta in vibrazione con una certa intensità, essa potrà o vibrare intera o dividersi spontaneamente in parti che vibrano separatamente ed all'unissono. Le superficie di separazione subiscono soltanto cangiamenti di densità e sono sensibilmente immobili, per la qual cosa si chiamano *nodi* di vibrazione: al contrario le parti di mezzo delle colonne d'aria comprese fra due nodi consecutivi conservano sempre la stessa compressione, ma compiono le più ampie oscillazioni, queste si chiamano *ventri* di vibrazione. Le vibrazioni dell'aria nei tubi sono longitudinali e la colonna d'aria vibrante è divisa in parti uguali da nodi e da ventri, sempre però in modo che al fondo del tubo corrisponde un nodo ed all'imboccatura un ventre. Quando si produce un nodo solo, questo è sempre al fondo del tubo e in tal caso trovasi un ventre all'imboccatura. Se il tubo è aperto da ambedue le parti, vi è maggiore difficoltà a far vibrare la colonna d'aria in esso contenuta, in modo che emetta un suono: in questo caso alle estremità dei tubi corrispondono sempre dei ventri; se vi è un nodo solo, esso trovasi nel

mezzo e ciascuna metà del tubo contiene una semi-onda sonora. Sopra questa distribuzione dei nodi e dei ventri è fondato l'uso dei fori che si praticano nelle pareti degli strumenti da fiato, come il flauto ed il clarinetto. Un foro dirimpetto ad un ventre non produce alcun effetto e non modifica punto il suono, mentre dirimpetto ad un nodo trasforma questo in un ventre e muta per tal modo le disposizioni assunte dalla colonna d'aria vibrante.

Le canne d'un organo presentano l'esempio più semplice e la voce umana quello più complicato di note musicali risultanti dalla vibrazione d'una colonna d'aria. Tali vibrazioni avvengono talvolta in colonne d'aria di ampie proporzioni, come sarebbe ad esempio il caso d'una chiesa ■ d'una sala; allora, quando una agitazione sonora sia eccitata da una causa qualunque, un orecchio bene esercitato distingue più o meno chiaramente una nota, la quale si chiama la nota dell'ambiente. Sopra questo argomento avremo occasione di entrare in maggiori particolari nel seguito del presente lavoro.

L'assorbimento del suono è un fenomeno analogo a quello che si presenta per la luce che cade sopra una superficie di color nero od oscuro, analogo ancora all'arrestarsi del movimento di un corpo che cade sopra una superficie soffice. Le medesime sostanze le quali farebbero cessare il movimento d'un corpo duro che cade sovr'esse, assorbirebbero pure il suono e, col distruggere le ondulazioni che lo propagano, impedirebbero la sua ulteriore espansione. Di più non aggiungiamo per ora a tale proposito, riservandoci di tornare, e con maggiori particolari, su questo argomento nella parte del presente lavoro specialmente dedicata alle applicazioni.

§ IV.

Intensità, tono, tempera.

Tutti i suoni, qualunque ne sieno l'origine ed il modo di propagazione, possono differire tra loro in intensità, tono e tempera.

Un suono può essere più o meno forte, più o meno intenso, vale a dire può colpire l'organo dell'udito con una energia più ■ meno considerevole. Talfiata l'impressione è così debole, che ci è d'uopo prestare la massima attenzione per percepirla; tal'altra è così forte

da cagionare perfino una sensazione dolorosa: i colpi d'artiglieria anzi cagionano di frequente una ferita agli organi auditivi abbastanza grave da determinare una sordità temporanea. Fra questi due estremi della intensità dei suoni, vi ha luogo per tutti i gradi possibili della sensazione auditiva. Trattando della propagazione del suono, abbiamo già avuto motivo di mettere in evidenza alcuni degli elementi dei quali è funzione l'intensità del suono: a complemento delle cose ivi esposte, ci limiteremo ad aggiungere qui in modo esplicito quanto facilmente si deduce dalle considerazioni precedentemente istituite.

È infatti evidente che la produzione d'un suono esige il concorso di tre elementi, vale a dire una sorgente sonora, un mezzo od un veicolo, e finalmente l'organo dell'udito che percepisca: ognuno di questi elementi può esercitare una certa influenza sulla intensità di un suono. Il volume, la forma del corpo sonoro e la natura della materia della quale è composto, il modo di scuotimento che si impiega per farlo entrare in vibrazione, l'energia del movimento che ricevono così le sue molecole, sono altrettante circostanze che fanno variare la ampiezza delle vibrazioni del corpo, e, per conseguenza, ciò che potrebbe chiamarsi col nome di *intensità intrinseca del suono*. Ma la natura del mezzo che trasmette il suono, la sua densità, la sua temperatura, il suo stato di riposo o d'agitazione, sono ancora circostanze dalle quali dipende questa intensità, che però non sarebbe già più la intrinseca. Finalmente si comprende come in tale argomento gran parte debba farsi alla sensibilità dell'orecchio, la quale varia da persona a persona non solo, ma anche in un medesimo individuo dipende da circostanze affatto particolari.

Ma due suoni di uguale intensità non sono perciò identici. Uno può essere più *alto*, più *acuto* dell'altro, o, se si voglia, quest'ultimo ci apparisce più *basso* o più *grave*. Il grado di acutezza o di gravità d'un suono si chiama *tono* od anche *altezza*. Il tono dipende dal numero di vibrazioni che compie in un determinato tempo il corpo sonoro, risultando dalla esperienza che, quanto più celeremente si succedono le vibrazioni, tanto più il suono è alto od acuto. In un'aria di densità e di elasticità costanti ed uniformi, una medesima lunghezza d'onda corrisponde sempre ad un medesimo tono. Ma se la densità e l'elasticità non sono uniformi: se noi supponiamo, per esempio, che l'onda sonora passi da un'aria fredda ad una calda, ne risulterà un aumento della lunghezza d'onda senza cangiamento di tono, poichè la rapidità colla quale le onde si succedono ed arrivano al nostro orecchio non muterà.

Reciprocamente, la lunghezza d'onda rimanendo la stessa, il tono sarà più elevato nell'aria calda che non nella fredda, poichè la successione delle onde sarà più rapida.

Finalmente, quando due suoni sono ad un tempo della medesima intensità e della stessa altezza, possono differire ancora sotto un altro punto di vista; possono cioè avere ciascuno un timbro particolare. La tempera, o timbro (detta anche, quando si tratti della voce, *metallo*), è la natura intima, la qualità particolare ed intrinseca dei suoni: essa è assolutamente indipendente dalla intensità e dalla gravità od acutezza dei suoni, od, in altre parole, non dipende nè dalla ampiezza, nè dalla lunghezza delle vibrazioni. La definizione rigorosa del timbro esigerebbe che se ne conoscesse la causa e per risalire a questa noi ci vedremmo costretti ad entrare in particolari, i quali sarebbero ben poco in armonia collo scopo essenzialmente pratico della presente nostra fatica. Chi vorrà per proprio conto approfondire questa ricerca, ne troverà tutti gli elementi nell'opera colossale che Helmholtz diede alla luce intorno alla teoria fisiologica della musica. Noi ci contenteremo di dare una idea di ciò che si intende per timbro, ricorrendo ad alcuni esempi. Un flauto, un violino, un corno, sui quali fosse suonata la medesima frase musicale, farebbero intendere i medesimi suoni colla medesima intensità e colla stessa altezza, ma produrrebbero ciononpertanto sull'orecchio una impressione ben diversa l'uno dall'altro: or bene, si dice che essi differiscono fra loro per il timbro. Ancora si è il timbro od il metallo che, per gran parte, contribuisce alla immensa e meravigliosa varietà delle voci umane e che ci permette di riconoscere le persone che ci sono familiari, al solo udirne la voce, senza che abbiamo bisogno di vederle.

Tutti i suoni, qualunque ne siano i toni, le tempere e le intensità si propagano nell'aria colla medesima velocità.

§ V.

Vibrazioni simpatiche.

Corpi, capaci di vibrare in modo da produrre un determinato suono, vibrano quando un suono della stessa altezza sia prodotto in vicinanza ad essi.

Il fenomeno delle cosidette vibrazioni simpatiche si verifica non solo per quei corpi sonori che, fatti vibrare, danno un suono musicale distinto, ma altresì per altri, dei quali non può dirsi che abbiano un suono ad essi proprio. I corpi della prima categoria non sono messi in movimento sonoro se non da quei suoni che essi stessi sono capaci di emettere, p. e., dalla loro propria nota fondamentale o dalle sue armoniche (1), mentre invece quegli altri possono vibrare quando parecchie note sieno prodotte in vicinanza ad essi. La ragione di questi fatti sta in ciò che le vibrazioni del corpo sonoro si comunicano all'aria, e dall'aria a tutti gli altri corpi allo intorno, con questa differenza che non tutti possono ripetere il suono che viene ad eccitarli. Per far vibrare un corpo sensibilmente non basta, in generale, il primo impulso delle vibrazioni aeree, ma si richiedono urti ripetuti a molte riprese e concordanti col movimento naturale del corpo. Gli urti hanno bensì luogo nelle pulsazioni in questione, ma se il corpo non vibra all'unissono coll'aria che lo colpisce o con tempi di vibrazione multipli di quelli dell'aria, ricevuta la prima spinta, obbedisce alla medesima, e, muovendosi nel senso di essa, o ritornando indietro, riceve scosse in senso contrario al suo movimento, le quali elidono in parte la velocità prima comunicata ed il corpo non può regolarmente vibrare. Invece, se le vibrazioni sono all'unissono, o quelle del corpo sono multiple di

(1) Ci sia lecito di ricordare qui la stupenda spiegazione che di tale fenomeno è data da Galileo nella Giornata Prima delle *Scienze Nuove* a proposito del problema ch'egli intavola come segue: « Qual'è la ragione del meraviglioso problema della corda, della cetera, del cimbalo, che muove e fa realmente suonare quella non solo che all'unissono gli è concorde, ma anco all'ottava e alla quinta? ».

quelle dell'aria, le pulsazioni successive di questa concorrono ad accrescere il movimento del corpo, il quale finisce per dare quel suono.

Cosiffatte vibrazioni hanno una grande importanza per ciò che possono essere utilizzate nel rinforzare un suono, ed a tale scopo può in particolare servire la seconda categoria delle sostanze summenzionate, e fra esse, in ispecial modo le sottili tavole di legno. È vero che i corpi i quali possiedono una nota loro caratteristica, sono eccitati con molto maggiore violenza che non altri, quando questa nota o le sue armoniche sieno date da qualche corpo sonoro in prossimità od a contatto, ma in tal caso esse non rispondono a nessuna altra nota, mentre invece, per modo di esempio, una sottile tavola di legno bene stagionato risponderà quasi egualmente bene a qualsiasi nota od a qualsiasi combinazione di note. Tale proprietà rende le sottili tavole di legno di un impiego necessario per le piastre armoniche dei pianoforti, per i corpi degli strumenti ad arco e per altri usi musicali. È noto infatti che le qualità offerte da uno di tali strumenti, e per le quali essi appariscono più o meno perfetti musicalmente parlando, non dipende affatto dalle corde che sono poste in diretta vibrazione, ma dalle qualità inerenti al corpo di rinforzo che quelle corde mettono in vibrazione simpatica.

§ VI.

Interferenze.

Se in due sistemi di onde sonore la condensazione coincide colla condensazione e la dilatazione colla dilatazione, il suono risultante dalla sovrapposizione è più forte di quello prodotto da ognuno dei due sistemi. Ma se le condensazioni di un sistema coincidono colle dilatazioni dell'altro, vi ha distruzione totale o parziale dei due sistemi.

Se noi prendiamo a considerare la questione sotto un punto di vista affatto generale, riconosciamo che, allorquando più sistemi di onde che emanano da centri di agitazione distinti, si propagano

nell'acqua o nell'aria, il movimento d'ogni molecola è la somma dei movimenti ad essa comunicati. Nel caso dell'acqua, allorquando le creste d'un sistema di onde coincidono colle creste d'un altro sistema, la sovrapposizione dei due sistemi ha per risultato un aumento nella altezza delle onde: se i solchi d'un sistema coincidono coi solchi dell'altro, la depressione è doppia; se, finalmente, le creste di un sistema coincidono coi solchi dell'altro, i due sistemi si distruggono totalmente o parzialmente. Questa distruzione mutua di due sistemi di onde si chiama interferenza.

Le medesime osservazioni si applicano alle onde sonore.

Supponiamo che due scuotimenti sonori, emanati da due sorgenti diverse, si propaghino nel medesimo mezzo elastico, per esempio, nell'aria. Le vibrazioni o le onde aeree che ne risultano, coesisteranno generalmente nel mezzo, vale a dire che in ogni punto e ad ogni istante avverrà sovrapposizione dei piccoli movimenti che costituiscono tali vibrazioni. Le condensazioni e le dilatazioni successive si comporranno, tantosto aggiungendosi, tantosto sottraendosi, secondo le leggi della meccanica. Se i due suoni hanno la medesima lunghezza di ondulazione, ovvero la stessa altezza e la medesima intensità, essi potranno distruggersi, basterà perciò che le due onde abbiano fasi opposte, che cioè la semi-onda condensante dell'una coincida esattamente colla semi-onda dilatante dell'altra. Distruggendosi i due movimenti, il mezzo elastico rimarrà in riposo in tutti i punti nei quali avrà luogo questa distruzione di movimenti, vale a dire ne risulterà il silenzio.

Wheatstone ed Helmholtz dimostrarono, ciascuno con esperienze originali, la esistenza delle interferenze. Limitandoci, per amore di brevità, ad una succinta esposizione delle esperienze istituite dal primo di questi due scienziati, diremo che egli si servì di un tubo sonoro a due rami biforcuti, cioè in forma di Y: disponendone le aperture al disopra di una piastra vibrante, che egli faceva risuonare, otteneva a volontà tanto un rinforzo del suono prodotto, quanto il silenzio del tubo. Vi era rinforzo di suono quando le due aperture erano collocate dirimpetto a due ventri consecutivi, ovvero dotati di movimenti in senso contrario.

Perchè due onde sonore possano distruggersi per effetto di interferenza, è mestieri che i suoni sieno esattamente all'unissono ed abbiano la medesima intensità. Quando la prima di queste condizioni non rimanga soddisfatta, il concorso dei due suoni produce ancora, in certi casi, dei fenomeni assai interessanti che si designano coi

nomi di battimenti e di suoni risultanti. A questo riguardo però non entreremo in ulteriori particolari, per ciò che essi non interesserebbero direttamente il vero scopo del presente lavoro.

§ VII.

Portata dei suoni.

In via di conchiusione a queste premesse teoriche aggiungeremo qui alcune nozioni sul limite di percettibilità dei suoni.

Il limite al quale un orecchio di sensibilità media cessa di udire un suono è ciò che si chiama con proprio nome la portata di questo suono.

Il ragionamento e la esperienza vanno d'accordo nel mostrare che questo limite dipende e dalla intensità intrinseca dello scuotimento e da tutte le altre circostanze che modificano la intensità del suono lungo il suo percorso sino all'orecchio. Così la portata d'un suono deve variare colla natura del mezzo nel quale il suono si propaga, colla densità di questo mezzo, la sua temperatura, ecc., in una parola, colla maggiore o minore omogeneità dei suoi strati successivi (1).

Scendendo ad alcuni particolari, accenneremo sommariamente, per ora, che, quanto alla portata della voce umana, il Saunders, dopo accurate esperienze, stabilì che una voce ordinaria rimane sempre distintamente percettibile entro settanta piedi inglesi, vale a dire poco più di ventun metri: del rimanente, quando si sforzi la voce in condizioni d'ambiente favorevoli, questo limite resta di molto oltrepassato. Così, si racconta che nelle regioni polari Foster potè tener conversazione con un'altra persona alla distanza di 2000 metri, e nei trattati di acustica si trovano citati casi, più o meno degni di fede, nei quali la voce umana si sarebbe udita alla distanza di cinque, otto e perfino sedici chilometri.

Per tener parola anche della portata di altri suoni, aggiungeremo

(1) Potranno vedersi a tale proposito le importanti conchiusioni alle quali pervenne l'Henry nelle sue *Researches in Sound*, pubblicate nell'*Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution ecc.* for the year 1878. Washington, 1879, pag. 556 e seg.

che, secondo Hinrichs, gli strumenti d'ottone di un'orchestra russa, si udivano a più di sette chilometri di distanza, ma crediamo affatto superfluo l'aggiungere a questo riguardo ulteriori particolari.

Quanto al limite di percettibilità dei suoni, è noto che l'orecchio umano non percepisce i suoni musicali se non entro certi confini. Se il numero delle vibrazioni per secondo è inferiore a 16, l'orecchio non percepisce che urti separati: se è superiore a 38000 non percepisce più alcun suono.

PARTE SECONDA

LE LEGGI DI ACUSTICA
NELLA PRATICA

PRELIMINARI.

Della propagazione del suono all'aria aperta ed in luogo chiuso.

Nell'accingerci a studiare la applicazione delle leggi di acustica alle disposizioni da darsi agli edifizi, nei quali interessa che la voce umana ed i suoni in generale si diffondano nel miglior modo possibile, vogliamo anzitutto ricordare la massima stabilita da uno dei fisici più autorevoli in materia di acustica, vale a dire che: « *Non v'ha edifizio, per quanto costruito con tutte le cure, nel quale le leggi della acustica sieno così bene osservate come l'aria aperta* ». Quivi infatti, con una atmosfera perfettamente tranquilla, senza ostacoli i quali influenzino la propagazione delle onde sonore, il suono si troverà nelle condizioni più favorevoli ad una uniforme diffusione.

Senonchè, anche all'aria aperta, la distinta percezione dei suoni per parte d'un uditorio numeroso è funzione di alcuni elementi, la cui rispettiva influenza è difficile di poter esattamente valutare. Così, per modo di esempio, se noi supponiamo un oratore il quale pronunzi un discorso in presenza d'una moltitudine, è certo che se l'ondulazione del terreno od un palco gli permette di trovarsi in una posizione alquanto elevata in confronto di quella occupata dalla massa degli uditori, la sua voce sarà udita da un numero di persone di gran lunga maggiore, che non quando egli si trovi in perfetta pianura, o, per mezzo di qualche espediente, egli non si sollevi alquanto sopra la folla: ma quanto facilmente si comprende che in questo secondo

caso si riduca e di molto il numero delle persone che giungeranno ad udire quella voce, altrettanto difficile riesce il determinare con esattezza, od anche soltanto approssimativamente, in quali proporzioni questo numero vada variando colle accennate circostanze.

Intorno alla diffusione della voce all'aria aperta furono istituite accurate esperienze dal Saunders (1), che ne consegnò i risultati nell'opera notevole da lui scritta sulla architettura dei teatri. Da tali esperienze si rileva che una persona, la quale legga un libro con voce ordinaria, in luogo perfettamente piano ed aperto, con atmosfera tranquilla, può essere udita, di fronte, alla distanza di 92 piedi (2), di 75 piedi ai fianchi, e di 31 piedi al di dietro; per modo che la portata della voce umana in tali condizioni verrebbe ad essere rappresentata dalla figura 2, nella quale si suppone che il lettore sia collocato in A e tenga la faccia rivolta nella direzione di A B.

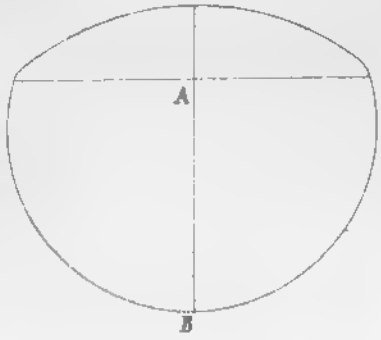


Fig. 2.

Esperienze analoghe vennero eseguite dal prof. Henry di Washington, il quale ne registrò i risultati in una pregevolissima memoria: *On Acoustics applied to public buildings* (3). In un cerchio, scrive

---

(1) *Treatise on Theatres, including some experiments on sound.* London, 1870, Chapter 2.

(2) Abbiamo creduto opportuno di mantenere le misure inglesi, allo scopo di evitare le frazioni che risulterebbero dalla traduzione in sistema metrico decimale: basterà ricordare qui che un piede inglese equivale a 0^{m}, 3048.

(3) *Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution*, ecc., for the year 1856. Washington, 1857, pag. 224. — Intorno a questo medesimo argomento altre cifre sono offerte dal SAELTZER. (*A treatise on acoustics in connection with ventilation; and an account of the modern and ancient methods of heating and ventilation.* New-York, 1873, pag. 17, 41), però in modo quasi dogmatico, senza accennare ad alcuna esperienza, la quale vi abbia condotto. Noi non avremo occasione di ritornare più su questo lavoro, il cui titolo promette assai più che non mantenga, ci contenteremo quindi di aggiungere qui che l'autore vi sostiene essere la mancanza di una buona ventilazione la sola ed unica causa delle eventuali cattive condizioni acustiche di un ambiente. Egli enuncia come una sua grande scoperta l'aver verificato che il suono, tosto emesso, sfugge nelle parti superiori dell'ambiente, dalle quali può essere diffuso per tutte le parti

egli, di 100 piedi di diametro, coll'oratore nel centro e l'uditore successivamente in punti diversi della circonferenza, la voce era udita più distintamente di fronte, gradatamente meno ai fianchi e finalmente riusciva appena percettibile al di dietro. Il rapporto delle distanze per una distinta audizione direttamente di fronte, ai fianchi ed al di dietro fu all'incirca di 100, 75 e 30. Questi risultati collimano adunque con quelli testè riferiti siccome ottenuti dal Saunders.

Tuttavia Sir Cristoforo Wren, il famoso architetto della Cattedrale di San Paolo di Londra, in una sua lettera relativa alla costruzione delle chiese, inserita nei « Parentalia » (1), mostra d'aver seguito un criterio di portata assai più limitata. Egli scrive infatti: « Una voce moderata può essere udita a 50 piedi di distanza di fronte al predicatore, a 30 piedi ai lati ed a 20 piedi al di dietro, ■ questo a condizione che l'oratore pronunzi le parole in modo ben distinto ». Questi risultati non sono che apparentemente in disaccordo coi due in antecedenza registrati, giacchè in realtà vennero ottenuti partendo da criteri assolutamente diversi: si comprende infatti che, a meno di circostanze favorevolissime, e quasi diremmo eccezionali, non può esservi termine di paragone fra tre esperienze, due delle quali, quelle del Saunders e dell' Henry, suppongono un solo uditore, il quale, mutando continuamente di posizione rispetto alla persona che parla, viene a stabilire gli estremi limiti ai quali la voce riesce tuttora percettibile, e la terza, quella del Wren, la quale suppone un predicatore che parla ad una folla: a prima giunta si riconosce che in questo secondo caso molti e svariati saranno gli ostacoli, i quali concorreranno a limitare notevolmente il numero delle persone che giungeranno ad intendere la voce dell'oratore. Anzitutto è certo che, anche

---

dell'ambiente medesimo, mediante una buona ventilazione. Aggiungeremo ancora che nè i principi di acustica sui quali egli si appoggia, nè gli argomenti che egli invoca in favore della sua, ch'egli chiama ripetutamente « astounding discovery », sono tali da indurre ad abbracciare le di lui opinioni: noi ci permettiamo anzi di rivocare in dubbio i risultati meravigliosi che egli asserisce di aver ottenuto mediante tale sistema, giacchè sarebbero in aperta ■ completa opposizione colle leggi ed i principi di acustica meglio accertati dalla scienza ■ dalla esperienza. Più innanzi vedremo quale sia la parte che realmente deve essere fatta alla ventilazione nei riguardi dell'acustica. — Nuove ed importanti conclusioni sulla influenza esercitata dal vento sulla propagazione del suono furono dedotte dall'HENRY e trovansi registrate nell'*Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution* for the year 1878. Washington, 1879, pag. 492, 527 e seguenti.

(1) Pagina 318.

ammettendo un silenzio perfetto per parte dell'uditorio, le persone più vicine a chi parla costituiscono esse stesse un ostacolo materiale che restringe la sfera di azione del suono; di più, la superficie irregolare costituita dalle teste dell'uditorio è tutt'altro che opportuna alla condotta del suono; finalmente una qualche influenza sarà pure esercitata dalle impurità dell'atmosfera e dalla ineguaglianza della sua temperatura cagionate dalla respirazione della folla e dal calore che da essa emana. Siffatte circostanze non furono tenute a calcolo dall'Henry nelle considerazioni colle quali accompagnò i risultati di esperienza surriferiti e da lui ottenuti.

Queste esperienze del resto appartengono alla categoria di quelle che ognuno può agevolmente ripetere e, così facendo, si riconosce che anzitutto la voce articolata non riesce ben chiara e non è facilmente intesa che allorquando essa viene lentamente emessa e propagata con una certa uniformità, però senza monotonia: perchè la si intenda nettamente, la parola deve arrivare all'organo dell'udito semplice e senza accompagnamento. Date però le migliori condizioni, la voce di un oratore che parli ad una folla all'aria aperta, non può giungere alla distanza di circa ventotto metri, ammessa dal Saunders, a meno di un notevole sforzo, o nel caso di un organo di voce eccezionale, che ad ogni modo non potrebbe assumersi prudentemente come criterio di confronto e di giudizio. Noi crediamo pertanto di non andar lontani dal vero, assumendo, in base alla esperienza, che una folla di persone radunate intorno ad un oratore che parlasse con voce ordinaria e le quali lo udissero distintamente, formando un gruppo consimile nella sua configurazione al diagramma del Saunders (fig. 2), verrebbero ad occupare un'area dai 450 ai 500 metri quadrati. Questa area potrebbe contenere un migliaio di persone sedute nel modo che d'ordinario si pratica nei luoghi di pubbliche riunioni ed il doppio o qualche cosa di più se stessero in piedi.

Un tale risultato d'esperienza collima col dato assunto da Rhode (1), il quale, prendendo per guida gli esperimenti del Saunders, afferma che in un teatro si può contare esclusivamente sulla naturale propagazione del suono, quando nessuno degli uditori si trovi ad una distanza superiore a circa 20 metri da chi parla, ed aggiunge che un tale teatro potrebbe contenere sedute circa 2000 persone, vale a dire un numero doppio di quello che conterrebbe se tutte dovessero sedersi sopra un piano orizzontale.

---

(1) *Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler.* Berlin, 1800, pag. 31-32.

Il Wren, trattando della costruzione delle chiese nello scritto testè citato, opina che in uno di tali edifizi tutto al più duemila persone possono vedere ed udire in buone condizioni, ed infatti, prendendo in esame le fabbriche per uso ecclesiastico da lui progettate e costruite, si riconosce che nella maggior parte di esse il valentissimo architetto tenne precipuamente a calcolo la naturale propagazione del suono, per far sì che la voce degli oratori ricevesse una uniforme diffusione e fosse distintamente percepita dall'uditorio.

Supponiamo ora di avere questo uditorio composto di un migliaio di persone sedute e che si tratti di coprire l'area da esso occupata mediante un tetto e di circondarla di muraglie: con ciò solo le condizioni di audizione sono alterate sotto diversi punti di vista, ma se quel pubblico si trovava prima in buone condizioni acustiche, è evidente che, ammesso che non sia richiesto di ricorrere a particolari espedienti onde accogliere nel recinto coperto e limitato un maggior numero di persone, se si giungerà a fare in modo che per la chiusura dell'area tali condizioni non vengano peggiorate, nulla più potrà chiedersi ad un architetto. Di qui seguirebbe quindi che negli edifizi di moderate proporzioni gli sforzi dell'architetto devono essere diretti ad evitare la introduzione di ostacoli che si oppongono alla libera propagazione del suono.

Senonchè potrebbe desiderarsi che, coprendo una data area e circondandola di muraglie, vi si potesse accogliere un maggior numero di persone e che queste pure avessero a trovarsi in condizioni tali da udire la voce dell'oratore, od in generale i suoni prodotti nell'ambiente, così bene come un numero più ristretto era al caso di udirli all'aria aperta. Date queste condizioni, è mestieri che, nello studiare le disposizioni da assegnarsi all'edifizio, si trovi modo di venire in aiuto alla propagazione della voce o dei suoni, affinchè essi riescano percettibili a quel maggior numero di persone che il locale dovrà contenere.

Sotto qualunque punto di vista si consideri la questione, conviene sempre aver presenti i vantaggi e gli inconvenienti che un edifizio può presentare in confronto dell'aria aperta. Da un lato l'edifizio, considerato in generale, si offre sotto condizioni favorevoli, avuto riguardo alla tranquillità dell'aria ed alla molto minore influenza dei rumori esterni, ed inoltre alla facoltà che ha l'architetto di collocare l'uditorio e l'oratore, o quella qualsiasi altra sorgente dei suoni, nelle posizioni relative ch'egli giudicherà meglio opportune. Dall'altro abbiamo una folla di inconvenienti, che a suo luogo analizzeremo, che nella pratica si presentano molte volte con caratteri di quasi

inevitabilità e che sono tali da far si che nella maggior parte dei casi debba proporsi il problema, non già di venire in aiuto alla propagazione ed alla uniforme diffusione del suono, ma di evitare semplicemente i multiformi ostacoli che vi si oppongono.

Per procedere con ordine noi stabiliremo le seguenti proposizioni, che successivamente andremo discutendo ed analizzando:

1° Un fabbricato modifica sempre la normale diffusione del suono;

2° Esso può presentare ostacoli alla diffusione del suono;

3° Esso può coadiuvarla.

CAPITOLO I.

DEGLI OSTACOLI CHE SI OPPONGONO ALLA UNIFORME PROPAGAZIONE ED ALLA DISTINTA PERCEZIONE DEI SUONI.

§ 1.

Generalità.

Che un fabbricato modifichi la normale diffusione del suono è provato dalle poche cose che siamo venuti esponendo fin qui, è provato dai principi generali di acustica che abbiamo assunti come punto di partenza e dai quali risulta indiscutibilmente che un ostacolo qualunque, e quindi un muro od un sistema di muraglie, modifica la propagazione delle onde sonore fino a produrre fenomeni speciali di riflessione. E ciò in modo tale da rendere estremamente difficile al tecnico lo spingere le proprie indagini, oltre a constatare in via generalissima i risultati che, date certe condizioni, possono attendersene.

La natura degli ostacoli che possono opporsi alla normale diffusione del suono, i mezzi di evitarli non solo, ma altresì i rimedi *a posteriori*, quando sieno possibili, costituiscono il lato più importante della questione, e nei casi ordinari, quando un architetto sia riuscito ad evitare cosiffatti ostacoli, può riposare tranquillo sul suo operato, giacchè, confidando sulla naturale propagazione del suono, egli potrà lusingarsi di avere con tutta probabilità assicurate ai suoi committenti buone condizioni di audizione.

Gli è soltanto in casi speciali, come p. e., per talune sale da concerto, ovvero in ambienti di notevolissime proporzioni destinati ad altri scopi speciali, od in altre circostanze nelle quali non possono assolutamente eliminarsi eventuali ostacoli alla diffusione del suono, che la questione degli aiuti che esso potrà trovare nella disposizione

dell'edifizio dovrà essere profondamente studiata: con ciò non vogliamo dire ch'essa dovrà essere perduta di vista dall'architetto anche negli altri casi, ma mettere soltanto in evidenza che le sue cure principali devono essere rivolte ad evitare anzitutto tutto quanto può riuscire di nocumento allo scopo ch'egli deve proporsi di raggiungere.

Questi ostacoli noi ci accingiamo a studiarli con ogni particolare.

§ II.

Affievolimento ed assorbimento del suono. Impedimenti materiali alla sua propagazione.

Nella prima parte del presente lavoro abbiamo già avuto occasione di riconoscere come, aumentando la massa d'aria che il suono mette in vibrazione nel suo propagarsi, ne conseguiti un affievolimento nel movimento propagato. Per verità questa maniera di affievolimento non è affatto inerente ai fabbricati dei quali dobbiamo occuparci, giacchè anzi, di frequente, essi agevolano la ulteriore propagazione del suono in una determinata direzione coll'impedire la dispersione laterale. Però noi non dobbiamo mai perdere di vista che il naturale indebolimento del suono, mano a mano che si allontana dal centro fonico, è quello che impone dei confini alle possibili proporzioni di un uditorio, e che contro gli effetti di tale fenomeno noi dobbiamo operare con tutti i mezzi che sono in nostro potere ogniqualvolta debbasi eseguire una costruzione le cui dimensioni eccedano le ordinarie, eppure deva ciò non ostante trovarsi in buone condizioni acustiche.

Oltre al fenomeno di affievolimento del suono, conseguenza naturale del suo propagarsi a distanze maggiori, havvi ancora un'altra causa che può contribuire ad indebolirlo, e questa è l'assorbimento. Il suono sembra invero venir come assorbito dagli ampi spazi vuoti, particolarmente se questi si trovino al di sopra o al di dietro del luogo nel quale viene generato, e, come già abbiamo avuto occasione di notare, allorquando l'onda sonora s'incontra in superficie soffici e molli. Un uditorio, qualunque sia l'ambiente nel quale viene a trovarsi, ammortisce ed assorbe buona parte del suono colle vestimenta che indossa e per la superficie irregolare e non riflettente che esso presenta. Naturalmente ciò avviene tanto all'aria aperta come in uno spazio chiuso, ma, come è facile a comprendersi, in questo secondo

caso la influenza ne è maggiormente sensibile. I cortinaggi ed i tappeti, che di frequente si trovano nei luoghi ad uso di pubbliche radunanze, e pressochè sempre sul palco scenico dei teatri, concorrono essi pure a smorzare e ad assorbire il suono.

Questa particolare proprietà offerta dalle superficie soffici può talvolta essere utilizzata con notevoli vantaggi. Così, per modo di esempio, se in un dato ambiente si lamenti una soverchia risonanza, i tappeti ed i cortinaggi possono essere utilmente impiegati per attenuarla: infatti per impedire nocivi eccessi di suono e dove vi sia un eco, una cortina messa a proposito avrà per effetto di smorzare il suono o di arrestarlo prima che esso raggiunga la superficie sulla quale l'eco si produce. Questo espediente è ben noto e venne di frequente indicato ed adoperato con successo: lo stesso però non sembra potersi dire in via assoluta dei tappeti come rimedio per togliere la eccessiva risonanza e ad ogni modo, per quanto almeno è a nostra cognizione, non se ne fece scopo di un uso così frequente come dei cortinaggi. In circostanze ordinarie però l'influenza esercitata da un uditorio numeroso deve riguardarsi come sufficiente, ed anche in taluni casi come esuberante, e quindi dovranno in generale evitarsi i ricchi cortinaggi, le tappezzerie, e ciò particolarmente se il locale sia destinato a tenervi discorsi e conferenze.

Un distinto oratore, degnissimo di fede, che ebbe occasione di tenere frequentemente discorsi in ambienti di diversa natura, da noi interpellato se mai gli fosse accaduto di fare qualche osservazione sulle proprietà acustiche delle varie sale nelle quali gli avvenne di dover parlare a lungo, ci raccontò che alla distanza di pochi giorni egli dovette parlare nella medesima sala, in ambedue le circostanze ugualmente affollata: la prima volta la sala era completamente sguernita di cortinaggi e di tappezzerie ed egli potè quindi senza alcuno sforzo giungere alla fine del suo discorso: la seconda volta, celebrandosi una commemorazione funebre, eransi posti ricchi cortinaggi neri alle finestre ed alle porte, erasi riccamente tappezzata con panno nero la tribuna ■ fin dalle prime parole egli dovette talmente elevare la voce che dopo pochi minuti era rauco ed a mala pena potè giungere alla fine del suo discorso.

La quantità di suono che viene assorbita negli ambienti di grandi dimensioni, male ammobigliati, o vuoti, è grandissima, molto maggiore anzi che non potrebbe supporsi a prima giunta: contro gli inconvenienti che derivano da tale causa l'architetto deve e può sempre guardarsi se nel redigere il suo progetto è messo in avvertenza contro le gravi

conseguenze che per la uniforme diffusione del suono possono avere gli spazi vuoti. Un uditorio è una necessità: pressochè sempre lo sono pure i cortinaggi e le tappezzerie, e se per queste circostanze si ha assorbimento di suono, non lo si può evitare; ma uno spazio vuoto e messo in luogo dannoso non è mai necessario e trae sempre seco gravi inconvenienti.

Tutti gli autori che trattarono della applicazione delle leggi dell'acustica alla conveniente disposizione degli edifizi sono d'accordo nel riconoscere che un considerevole volume d'aria, il quale si trovi al disopra o al di dietro di un oratore e che la di lui voce deve far vibrare, è estremamente dannoso alla distinta audizione, e che un considerevole volume d'aria al di sopra di un uditorio è pure dannoso, ma in grado minore. In alcune antiche chiese, specialmente protestanti, dove la predicazione è così gran parte degli esercizi religiosi, si trovano i così detti *sounding-boards*, i quali sembrano avere per iscopo di sottrarre la enorme massa d'aria che si trova nella parte superiore della chiesa, alla influenza diretta della voce dell'oratore. Però, dove l'estetica architettonica non richieda una imponenza di edificio, come avviene per le chiese, dovrà aversi cura di dare all'ambiente tali proporzioni e tali disposizioni da impedire che la voce od i suoni in generale si disperdano per effetto di una eccessiva altezza dell'ambiente, molto più in quei casi nei quali l'uditorio trovandosi situato sopra un piano, i suoni vanno a disperdersi là dove nessuno deve udirli.

Il costume di collocare l'orchestra di una sala da concerti in una specie di sfondo, abbassando su di essa il soffitto è ora comunemente adottato e con buoni risultati, poichè esso limita il volume d'aria al di sopra del luogo dove si produce il suono. Non è forse nocivo ad un oratore, come risulta dall'esperienza, l'avere un *piccolo* spazio vuoto dietro di sè, ma a condizione che esso sia molto più basso e più ristretto che non il rimanente dell'edifizio.

Una autorità scientifica lasciò scritto a tale proposito che le sale nelle quali si vuole ottenere una distinta percezione del suono devono essere di buone proporzioni, ma piuttosto basse che alte, piuttosto lunghe che corte. Lo stesso Garnier, tuttochè affetti uno straordinario scetticismo in fatto di acustica applicata, riconosce la aggiustatezza di tali precetti (1). Se si restringono notevolmente gli spazi

(1) *Le Nouvel Opéra de Paris*, par M. CHARLES GARNIER. Texte. Deuxième ascicule. — Paris, 1879, pag. 147.

vuoti intorno all'oratore e al di sopra dell'uditorio, può darsi senza timore una maggiore estensione in lunghezza all'ambiente, senza pericolo che la perfetta audizione ne venga a soffrire.

Questi vacui pertanto, dei quali andiamo occupandoci, possono influenzare le condizioni acustiche di un ambiente anche per cause diverse da quelle appartenenti all'ordine di idee secondo il quale noi abbiamo avvertito la influenza esercitata dai cortinaggi, dalle tappezzerie e dalle superficie soffici in genere. Queste ultime infatti possono tutto al più smorzare il suono ed assorbirlo, ma non influenzano direttamente la *distinta* percezione, esse riescono quindi assai più nocive alla musica che non alla voce. I grandi vacui invece danno sovente origine a nuove ondulazioni le quali producono una sonorità che talvolta pregiudica la distinta percezione, ma che può anche migliorare la qualità del suono: tali sonorità per conseguenza, assai nocive alla percezione della voce, che, come abbiamo avvertito, per essere bene intesa deve giungere all'uditorio senza accompagnamento, lo sono, quando non eccedano una certa misura, assai meno a quella dei suoni musicali, specialmente nel caso in cui questi non sieno molto intensi.

Oltre agli ostacoli, che oppongono alla propagazione del suono l'affievolimento e l'eventuale assorbimento, sono a considerarsi ancora quelli che derivano da impedimenti che materialmente a tale propagazione si oppongono. A questo proposito osserveremo nuovamente che i fenomeni della luce e le condizioni della visibilità hanno una analogia strettissima con quelli del suono e della audizione. Questa analogia si manifesta fino ad un certo punto in modo evidente nel caso di impedimenti materiali alla diffusione del suono, ed il modo più semplice di descriverli consiste nel dire che tutto quanto sarebbe di ostacolo alla visibilità riuscirebbe per certo nocivo alla audizione, quantunque, ci affrettiamo tosto ad aggiungerlo, in proporzioni assai diverse.

I suoni che si propagano ad una considerevole distanza sono assai più facilmente arrestati od affievoliti da un ostacolo che interviene fra il corpo sonoro e l'uditorio che non quando questo si trovi in prossimità al centro fonico.

In ogni edifizio, il quale serva a scopo di pubbliche riunioni, deve, od almeno dovrebbe, provvedersi a che ognuno degli astanti riceva un raggio diretto e continuo di suono e possa con pari facilità vedere l'oratore. Per coloro che si trovano collocati ad una grande distanza, cosiffatti requisiti acquistano una importanza ancor maggiore; anzi-

tutto perchè, come già venne osservato, essi risentono in più forti proporzioni i cattivi effetti degli ostacoli e poi perchè, come è ben noto, la vista di chi parla agevola la audizione di ciò che egli dice.

§ III.

Degli ostacoli che alla uniforme diffusione e distinta percezione dei suoni possono derivare dalla disposizione dell'uditorio.

Le ricerche delle quali intendiamo occuparci nel presente paragrafo si riferiscono per verità in principal modo agli anfiteatri che servono a scopi di pubblico insegnamento, ma per le considerazioni che a tale proposito devono istituirsi ■ per le conclusioni alle quali si perviene, abbiamo creduto che questo fosse il luogo di tenerne parola, molto più che, come avremo motivo di riconoscere bentosto, una inopportuna disposizione dei seggi che devono essere occupati da un uditorio in certe categorie di luoghi per pubbliche adunanze, può costituire un gravissimo ostacolo al raggiungimento di quegli scopi che l'architetto deve proporsi.

Il primo cenno esplicito di studi fatti allo scopo di distribuire i seggi in un luogo di pubblica riunione in modo da assicurare ad ognuno degli intervenuti buone condizioni di visibilità e di audizione, si trova in una memoria pubblicata dal celebre architetto Scott Russell nell'*Edinburg New Philosophical Journal* del 1839: in seguito l'argomento venne svolto con molti particolari dal Lachez (1).

---

(1) *Acoustique et optique*, ecc., par Th. Lachez. Paris, 1879, pag. 159-219. — È bensì vero che l'autore dichiara (pag. 372) di aver condotto a termine i suoi studi fin dal 1835, tuttavia a stretto rigore storico deve ricordarsi che questi studi egli non li diede alla luce per la prima volta che nel 1848, mentre nell' « *Evidence taken before a Select Committee to consider the best modes of ventilating and warming the New Houses of Parliament* » vi è fatta esplicita menzione dei loro principi fondamentali a proposito di un progetto per il Parlamento inglese presentato dall'architetto Giorgio Basevi fin dall'anno 1833. — Nella esposizione di questo argomento noi seguiamo fedelmente il Lachez, il quale, se non fu il primo a richiamarvi l'attenzione degli studiosi, è ancora oggidì quegli che ne trattò con maggiori particolari, avendo applicato anche alla pratica architettonica il risultato dei suoi studi.

Qualunque sia il posto occupato in un anfiteatro da un uditore situato in una fila qualunque posteriore alla prima, si comprende come una condizione essenziale perchè egli cominci dal vedere ciò che gli si mostra si è che egli non ne sia impedito dagli uditori che stanno dinnanzi a lui.

In un anfiteatro qualunque, inclinato secondo una linea retta, ovvero nel quale i seggi sieno disposti tangenzialmente ad una linea retta A B (fig. 3), supponiamo elevate delle verticali sul din-

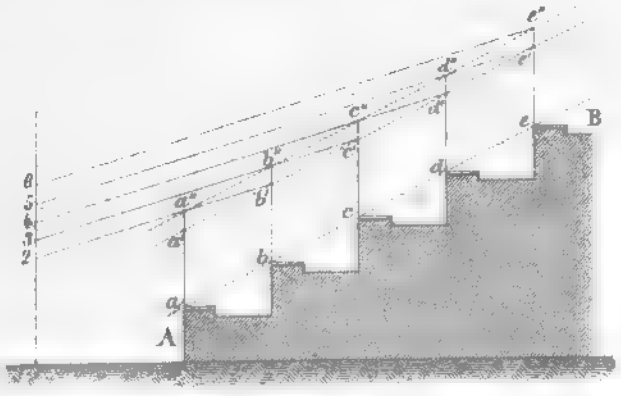


Fig. 3.

nanzi *a*, *b*, *c*, ... di ciascun banco e riportiamo sopra ciascuna d'esse una prima lunghezza aa', bb', cc', ... che rappresenti in media l'altezza dell'occhio di ogni individuo accomodato sul banco e di seguito alla prima una seconda lunghezza $a'a''$, $b'b''$, $c'c''$, ... che rappresenti in media la distanza che passa fra l'occhio e la parte superiore del capo. Se ora dai punti b', c', ... si conducono delle rette tangenzialmente alle teste a'', b'', ... degli uditori che occupano la fila anteriore, queste rette verranno a riuscire ai punti 2, 3, ... e saranno fra loro parallele, perchè partono da punti presi ad uguale distanza sulle verticali $b'b''$, $c'c''$, ... e distano le une dalle altre di distanze orizzontali sempre uguali. Ne segue che le visuali parallele $b'a''2$, $c'b''3$, ... si elevano a misura che si alzano le gradinate alle quali si riferiscono e per conseguenza si elevano sempre più i punti 2, 3, ... ai quali vanno a riferire. Il punto visibile da tutte le parti di un anfiteatro non potrà adunque essere se non quello che è visibile da uno spettatore collocato sul più alto gradino, poichè egli solo, impedito dalla testa dello spettatore situato nella fila antecedente e che gli serve di schermo,

non può abbassare lo sguardo, mentre invece gli altri possono elevarlo. Così avviene che in molti anfiteatri costruiti senza che si abbia riguardo a questa circostanza, l'oggetto da vedersi, od il punto verso il quale devono convergere gli sguardi degli astanti, è collocato così basso che non riesce pienamente e comodamente visibile se non a quelli collocati nella prima fila. Dato quindi questo punto, si domanda quale sarà la inclinazione da assegnarsi alle gradinate perchè esso riesca visibile da tutte le parti di un ambiente di determinata grandezza. Questo punto può essere considerato come il centro di una sfera o di una porzione di sfera: infatti, se fosse possibile di collocare gli spettatori in modo che i loro occhi vengano ad essere situati sulla superficie medesima della sfera, a distanze convenienti gli uni dagli altri, tutti ne vedrebbero certamente il centro, ma, siccome ciò tornerebbe impossibile, ne viene la convenienza di ravvicinare gli uni al centro dell'anfiteatro, di allontanarne gli altri e di giungere così ad una superficie, sulla quale trovandosi gli occhi degli spettatori, possano tutti godere di condizioni ugualmente buone di visibilità e quindi anche di audizione.

Determinati una volta in pianta, a convenienti distanze gli uni dagli altri, i posti che gli spettatori devono occupare, resta quindi a trovarsi una disposizione tale per cui le singole visuali possano liberamente dirigersi al punto da vedersi, senza perdita di spazio. S'immagini pertanto una serie di triangoli (fig. 4) aventi il vertice co-

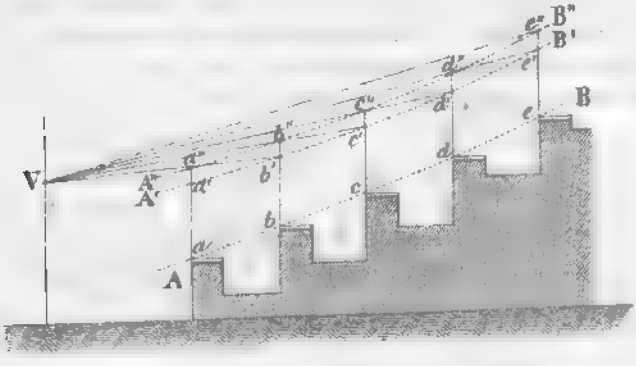


Fig. 4.

mune nel punto da vedersi V, per basi le verticali $b'\ b''$, $c'\ c''$..., e per lati i raggi che partono da V e vanno a riferire a questi punti b', b'', c, c''...; in a', b', c'..., supponiamo collocati gli occhi degli spettatori, i quali

potranno tutti vedere ugualmente bene il punto V quando si dispongano le gradinate in modo da mantenere ogni fila di spettatori all'altezza voluta, e non già arbitraria e dettata dal solo caso come ordinariamente si usa.

Anzitutto adunque dovrà bene stabilirsi questo principio: prima di ogni altra cosa si collochino a posto gli occhi degli spettatori, le gradinate si disporranno poi all'altezza conveniente, anzichè procedere nel modo inverso, vale a dire fissando prima la posizione delle gradinate e dei seggi, senza preoccuparsi in modo alcuno di sapere se poi gli spettatori saranno collocati troppo alti o troppo bassi gli uni rapporto agli altri e rapporto ad un punto dato da vedersi, ed obbligandoli quindi o a guardare attraverso lo spazio fra testa e testa degli spettatori che occupano la fila antecedente, od anche ad alzarsi od a stare in una posizione incomoda per gettare lo sguardo al disopra delle teste dei medesimi.

Gli studi istituiti a questo proposito dallo Scott Russell lo condussero a mostrare che i gradini di un anfiteatro devono essere collocati sopra una curva A B, la quale non è data *a priori;* i luoghi dei punti rappresentanti la posizione dell'occhio e quelli della sommità delle teste somministrano due curve A' B', A'' B'', dalle quali si deduce immediatamente la curva A B secondo cui devono essere fissate le gradinate.

Importa però di fissare alcuni dati prima di calcolare e di tracciare con metodo empirico la curva d'un anfiteatro, e sono: 1° la larghezza delle gradinate; 2° l'elevazione dei sedili sopra il piano su cui devono poggiare i piedi; 3° un'altezza media per la distanza verticale fra il piano delle gradinate e l'occhio dello spettatore; 4° una distanza ugualmente media fra l'occhio e la sommità del capo.

1° La larghezza delle gradinate si compone della larghezza che si assegna al sedile e dello spazio o passaggio fra il davanti d'un sedile ed il di dietro di quello precedente. Più il sedile è relativamente largo e lo spettatore vi sta assiso più comodamente, e quanto maggiore è la distanza fra due file tanto più facile è la circolazione; ma in queste circostanze il meglio non si ottiene che spendendo dello spazio, e se di questo siavi abbondanza, il meglio non può ottenersi che a spese della distanza, la quale deve essere economizzata tanto in senso orizzontale che verticale affinchè non se ne risentano le condizioni di visibilità e di audizione. È quindi indispensabile di dare ai sedili ed alle distanze fra le varie file di essi tutta la larghezza neces-

saria, ma nulla di superfluo: economizzando nelle distanze si può collocare un uditorio più numeroso, ma che starebbe a disagio, ed ancorchè si possa largheggiare non sarà opportuno di farlo per la ragione anzidetta. Tenuto calcolo di queste circostanze risulta che la larghezza delle gradinate deve essere da $0^m,60$ a $0^m,75$, assegnando da $0^m,20$ a $0^m,30$ al sedile e da $0^m,40$ a $0^m,45$ al passaggio.

2° L'elevazione dei sedili si determina più facilmente, e l'eccesso entro certi limiti, tanto nell'un senso quanto nell'altro non trae seco troppo gravi inconvenienti. E poichè in un uditorio vi sono persone di statura diversa si prenderà in media un' altezza uguale a quella delle sedie comuni, cioè $0^m,45$.

3° La distanza verticale fra il piano della gradinata e l'occhio dello spettatore è ancora una media che convien prendere fra le più alte e le più basse stature degli uditori, però avvicinandosi piuttosto alle prime che non alle seconde, giacchè è più facile impedisca la vista una persona di alta statura che non una di piccola. Questa distanza od altezza media può essere fissata a $0^m,75$, tenendo conto dell'abbandono naturale di una persona che per qualche tempo rimane seduta.

4° Finalmente la distanza fra l'occhio e la sommità del capo dovrà tenersi piuttosto grande, particolarmente nel caso in cui debbano far parte dell'uditorio anche delle signore, e ciò a motivo della pettinatura, la cui elevazione va variando coi capricci della moda, e del cappello, soggetto alle medesime oscillazioni, e che le signore tengono costantemente sul capo. Tale distanza potrà farsi variare da $0^m,15$ a $0^m,25$.

Queste considerazioni vennero da noi istituite, prendendo principalmente di mira le esigenze dell'ottica, le quali in simili casi devono anzitutto essere soddisfatte, molto più che, come si comprenderà facilmente, senza bisogno di ulteriori spiegazioni, in tal caso specialmente, tutto ciò che va a vantaggio della visibilità torna anche di vantaggio ad una buona audizione. La quale audizione, per riuscire perfetta, esigerà tanto più una economia di spazio, che ripetutamente abbiamo raccomandata, e ciò allo scopo di diminuire, per quanto è possibile, la massa d'aria che i suoni emessi o le parole pronunciate nell'ambiente devono mettere in vibrazione.

Lo Scott Russell, che, come abbiamo già avvertito, si occupò per il primo di proposito intorno a tali studi, chiamò *isacoustic* la curva secondo la quale devono disporsi le gradinate d'un anfiteatro, e che risulta

dalle considerazioni testè istituite. Abbiamo poi trovato anche cenno di un'altra curva proposta al medesimo scopo dal prof. Bache sotto il nome di *panoptic curve* (1), ma nulla ci riuscì di rinvenire intorno al modo di costruirla ed ai vantaggi che il proponente se ne riprometteva.

Si comprende del rimanente come le curve debbano variare, diremmo quasi, all'infinito, a seconda della posizione variabile del punto dal quale si parte, a seconda cioè, che questo punto è collocato più o meno vicino, più o meno alto rispetto alla prima fila dell' uditorio. Le figure 5, 6, 7, 8, 9 danno un'idea del modo nel quale queste curve

Fig. 5.

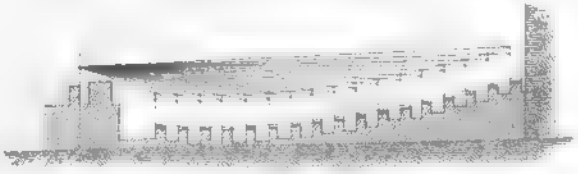


Fig. 6.

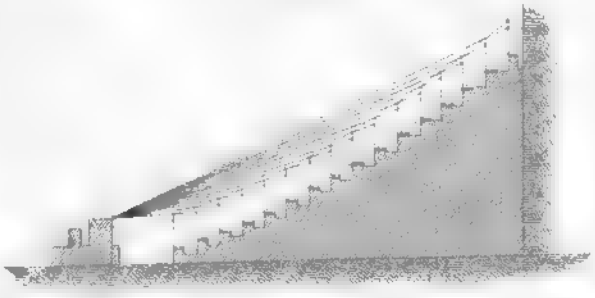


Fig. 7.

(1) Veggasi a questo proposito l'*Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution*, ecc. for the year 1856, pag. 234.

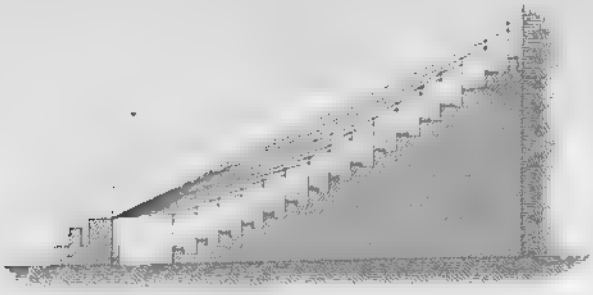


Fig. 8.

Fig. 9.

si modificano al modificarsi degli elementi dai quali dipende la loro forma. Le ordinate sono computate a partire da una orizzontale che passa per il piano del primo gradino; la prima di esse è composta di:

$$\begin{aligned} & 0^m,45 \text{ altezza del sedile} \\ 0^m,75 + 0^m,15 = & \ 0^m,90 \text{ altezza del busto e della testa} \\ \text{Totale } & 1^m,35. \end{aligned}$$

La seconda ordinata è composta dei due primi elementi ($0^m,45 + 0^m,75 = 1^m,20$), ma l'altezza alla quale si arriva con $1^m,20$, vale a dire il punto nel quale dev'essere collocato l'occhio sull'ordinata, è determinata graficamente da un raggio che passa per l'estremità dell'ordinata di $1^m,35$, vale a dire al disopra della testa precedente parte dal punto al quale si mira, od in altri termini, la posizione e

dell'occhio dell' uditore in seconda fila si ottiene sulla seconda ordinata conducendo per il punto a cui si mira e quello che rappresenta la sommità della prima testa una retta la quale va a tagliare la seconda ordinata nel punto cercato. Da questo punto portando all'ingiù sull'ordinata $0^m,75$ si ottiene il punto a cui deve arrivare il sedile, da questo portando ancora all'ingiù $0^m,45$ si ha il fondo della gradinata; finalmente dal punto che indica la posizione dell'occhio per l'uditore di seconda fila, portando sulla medesima ordinata all'insù $0^m,15$ si ottiene un nuovo punto, per il quale e per il punto di mira conducendo un nuovo raggio, esso andrà a tagliare la terza ordinata nel punto in cui deve essere collocato l'occhio dell'uditore di terza fila, e così di seguito.

Si è stabilito come essenziale che il punto a cui si mira deve essere anzitutto determinato in posizione e fissato in modo invariabile prima di tracciare la posizione dei sedili, ma nel caso in cui questo punto possa essere indifferentemente collocato più alto o più basso, più o meno vicino alla prima fila dell'uditorio, è mestieri tener conto della destinazione speciale dell'anfiteatro nel quale si può:

1° dover attendere ad un corso orale;

2° dover vedere una dimostrazione sperimentale ed intenderne la orale spiegazione.

Nel primo caso, in cui il professore o l'oratore stanno sulla cattedra, occupando una posizione press' a poco invariabile, basta che l'uditorio veda chi parla da ogni punto della sala. La cattedra può elevarsi più o meno al disopra della testa degli uditori che occupano la prima fila.

Nelle chiese, per modo d'esempio, dove il pergamo è elevato di

Fig. 10.

tre od anche quattro metri sopra il suolo, l'uditorio collocato sopra un piano orizzontale vede ancora l'oratore ad una certa distanza, gli

è soltanto quando si tratti di una lontananza piuttosto considerevole, p. e. di dieci o dodici metri, che si comincia a non discernerlo più con tanta facilità (fig. 10). Valendosi quindi della facoltà d'innalzare la cattedra si può dispensarsi dal collocare i sedili sopra gradinate propriamente dette, e ciò con notevole vantaggio sotto il punto di vista dell'economia nelle spese di costruzione (fig. 5, 6).

Nel secondo caso la disposizione precedente non può più convenire, non basta più vedere un solo punto, è mestieri poter vedere perfettamente tutti i vari oggetti ai quali si riferisce la dimostrazione sperimentale, e perciò conviene anzitutto che il piano orizzontale, sul quale questi diversi oggetti devono essere collocati, si trovi al disotto dell'occhio degli spettatori che occupano la prima fila: adempiuta questa condizione in modo soddisfacente, si determinerà la curva secondo la quale devono essere disposte le gradinate (fig. 8, 9), avendo particolare riguardo a ciò che vi sono alcuni limiti di distanza, i quali non possono essere oltrepassati; infatti, al di là di 12 metri di ascissa e 5 di ordinata non si può più vedere distintamente ad occhio nudo, particolarmente se si tratti di oggetti minuti o di esperienze delicate e di grande precisione.

Fin qui la disposizione da darsi all'uditorio venne considerata esclusivamente collo scopo di procurare a ciascun uditore un raggio diretto di suono ed una netta visuale. Una considerazione accessoria è messa in chiaro dal Rhode, il quale mostra che la disposizione dei sedili per gradinate, specialmente se secondo una curva, è eminentemente vantaggiosa, attesa la somma probabilità che con tale disposizione sieno evitati echi dannosi, ed aggiunge (1): « Qui cade in acconcio di indagare se in un teatro di forma circolare, nel quale i sedili sieno collocati in forma di gradinata gli uni sopra gli altri, possa, per effetto di questa disposizione, avvenire una riflessione di suono: locchè io nego recisamente. In un edifizio così costituito il suono non incontra mai nell'istesso istante una massa resistente capace di produrre una riflessione tale da riuscire percettibile all'udito. Il suono colpisce la prima fila dei sedili avanti la seconda, e l'eco riflesso dalla prima va perduto prima che avvenga quello della seconda, e così via ».

Abbiamo poco fa incidentalmente parlato delle chiese e della posizione che in esse viene ad occupare d'ordinario l'uditorio, e crediamo opportuno di ritornare sull'argomento per meglio chiarire il

(1) *Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler.* — Berlin, 1800, pag. 37.

nostro concetto. Da quanto siamo venuti esponendo taluno potrebbe forse trarre la conseguenza che per ovviare alle difficoltà che si oppongono ad una perfetta audizione e ad una completa visibilità per il fatto che, o l'uditorio è necessariamente collocato sopra un piano orizzontale, o l'oratore è soltanto ad una piccola altezza sopra tale piano, potrebbe bastare il porre chi parla in una posizione abbastanza elevata perchè ognuno degli astanti potesse udirlo e vederlo senza essere minimamente imbarazzato dalle teste dei vicini. Potrebbe anche aggiungersi che questo espediente venne usato assai di frequente, particolarmente nelle chiese costruite nell'ultimo secolo e nelle quali il pergamo si trova ad un'altezza straordinaria. Ci affrettiamo a soggiungere che questo provvedimento non corrispose sempre in modo perfetto, ed una delle ragioni di ciò deve riconoscersi nel fatto per cui chi parla emette la voce quasi in linea retta dinnanzi a sè. È anzi più naturale il parlare od il cantare sollevando la testa che non abbassandola: e se per parlare deve farsi uno sforzo, si alza istintivamente il collo e la testa spingendola all'indietro e questo movimento, che ha per effetto di mandare la voce all'insù, sembra necessario per permettere ai polmoni di maggiormente dilatarsi. Se, per riguardi di acustica, si vuol collocare l'oratore in posizione elevata, bisogna che egli si trovi molto, ma molto alto, vicino al soffitto o sotto un ampio riflettore. Chi ha frequentato le chiese di Roma, quando le funzioni della Settimana Santa si compivano con così grande apparato, ricorderà che in tale circostanza l'orchestra era collocata ad un'altezza straordinaria, quasi sotto la vôlta, ed il suono pioveva allora in certo qual modo sull'uditorio, riflesso all'ingiù dalla vôlta istessa. Il Chladni (1) va anzi più in là e scrive: « mi pare che la musica farebbe molto effetto in una sala rotonda col soffitto a vôlta: l'orchestra dovrebbe essere collocata molto in alto nel centro della cupola: l'effetto sarebbe lo stesso se il soffitto fosse conico o se la forma della sala fosse quadrata o poligona e quella del soffitto piramidale: il suono venendo dall'alto ed essendo riflesso quasi come in un portavoce, sarebbe percepito dovunque assai distintamente senza il minimo eco e senza pericolo di risuonanza prolungata ». Il Chladni cita poi, in appoggio di questa sua opinione, l'effetto meraviglioso che produce l'orchestra situata ad una grande altezza a Ludwigslust nella chiesa di corte del Duca di Mecklemburgo-Schwerin.

---

1) *Die Akustik.* — Leipzig, 1802, § 210.

In circostanze ordinarie però, e specialmente quando il soffitto dell'ambiente non sia costruito in modo da eliminare assolutamente il pericolo o di eco o di prolungate risuonanze, gli uomini più competenti in materia opinano che il piano di un pulpito o di una orchestra deva esser tenuto molto basso: (1) il Chladni medesimo, dopo aver portato parecchi esempi, allo scopo di provare che in via ordinaria nella pratica questa disposizione è ritenuta la più opportuna, adduce per ragione che, in un ambiente occupato da molte persone, gli strati inferiori dell'aria possedendo una densità molto maggiore in confronto dei superiori, qualsiasi ondulazione sonora ivi eccitata si espanderà molto più prontamente fra quegli strati e sarà da essi comunicata alle parti superiori e più leggiere dell'atmosfera di quello che avverrebbe se le ondulazioni eccitate in un'aria più leggiera dovessero poi propagarsi all'ingiro.

Un impedimento al libero passaggio del suono è cagionato da qualsiasi contraria corrente d'aria e da qualsiasi variazione nella qualità dell'atmosfera e nella sua temperatura, a motivo delle subitanee contrazioni e dilatazioni del mezzo attraverso il quale il suono deve passare.

La necessità di provvedere alla completa ventilazione di tutti i luoghi per pubbliche adunanze è un problema che si impone in via assoluta e rispetto al quale il problema dell'acustica apparisce di importanza accessoria: tuttavia vale la pena di essere osservato che un ambiente male ventilato si trova anche, generalmente parlando, in condizioni acustiche poco favorevoli. Inoltre l'architetto non deve dimenticare che anche una tenuissima corrente basta ad esercitare una certa influenza sull'andamento del suono, col favorire o coll'opporsi alla propagazione di esso ■ che per conseguenza nello studiare la ventilazione dell'ambiente sarà opportuno evitare le correnti dirette dall'uditorio verso la fonte dei suoni, od anche quelle che eventualmente attraversassero lo spazio che è fra l'uno e l'altra; ma che tornerà di vantaggio lo stabilire la ventilazione in modo che, qualunque movimento avvenga nell'aria, esso segua la direzione medesima nella quale il suono si vuole propagato.

Finalmente noi osserveremo come talune particolarità di un edifizio, le quali sembrerebbero funzionare entro certi limiti come impedimenti, sono invece assai opportunamente introdotte, poichè il loro uso assi-

---

(1) Nella *Allgemeine Musikalische Zeitung* di Lipsia, 30 agosto 1826.

cura vantaggi che difficilmente potrebbero in altro modo ottenersi. Un esempio di ciò si ha nelle colonne che si trovano d'ordinario nell'interno delle chiese, le quali, come avremo motivo di convincercene quando tratteremo delle chiese in particolare, quantunque interrompano in certo modo la propagazione del suono e della luce, furono sotto un certo punto di vista riconosciute di una certa utilità ai riguardi acustici.

§ IV.

Eccesso di risonanza.

La trasmissione del suono per mezzo di corpi elastici è accompagnata da fenomeni di risonanza. La risonanza in un determinato edifizio può essere definita per quella qualità che rende maggiormente intensi e prolungati i suoni in generale, nel modo del quale si è tenuto parola nella prima parte del presente lavoro, e deriva da vibrazioni eccitate dal suono stesso o nei materiali costituenti l'edifizio o nell'aria racchiusa fra il soffitto e le pareti.

Qui pertanto avvertiamo che ciò che, più o meno propriamente, si chiama col nome di risonanza delle vôlte è un fenomeno complesso dovuto tanto alla riflessione quanto alla risonanza propriamente detta. Il suono ripercosso dalle pareti d'una vôlta ritorna talvolta troppo presto per confondersi col suono diretto: in pari tempo le vibrazioni delle pareti che fremono e risuonano sotto la influenza della voce o dei suoni che la colpiscono, portano un nuovo elemento di confusione nel fenomeno generale.

Noi comprendiamo sotto il nome di fenomeni di eccessiva risonanza quegli effetti di eco indistinto ed incompleto, i quali, senza raggiungere le proporzioni di un eco percettibile, sono tuttavia sufficienti a confondere i suoni — effetti in una parola i quali si manifestano con grande frequenza e che sono da classificarsi fra gli ostacoli più difficili da superarsi.

Questo fenomeno dell'eccesso di risonanza è talvolta dovuto a difetti nelle proporzioni o nella forma dell'edifizio, talvolta ai materiali impiegati, talvolta ancora alla condotta dei suoni lungo le pareti e tal'altra infine ai vani che si trovano o nelle pareti stesse o nel soffitto o sotto il pavimento dell'ambiente. Esso va affatto distinto dall'eco

propriamente detto, quantunque alle volte un eco interrotto o frequentemente ripetuto sia la causa di questa interferenza o di qualche cosa di simile che può passarsi sotto lo stesso nome. Con tale riflesso la discussione di questo soggetto viene rimandata a quando ci occuperemo dei mezzi coi quali venire in aiuto alla propagazione del suono.

Gli ambienti di proporzioni considerevoli, specialmente se sproporzionatamente alti e con pareti piane continue, sembrano invero molto soggetti ad eccessi di risonanza: i soffitti a vôlte e gli ampi abbaini sembrano pure offrire condizioni favorevoli al presentarsi del fenomeno del quale stiamo occupandoci. Negli ambienti vuoti questo eccesso di risonanza è sensibilissimo ed esso va diminuendo di mano in mano che i pavimenti si vanno coprendo di tappeti e le finestre di cortinaggi.

È pertanto da desiderarsi che l'architetto stia in guardia contro l'umidità delle muraglie, la quale sembra trarre seco un considerevole eccesso di risonanza. Il dott. Hutton nel suo *Mathematical Dictionary* porge parecchi esempi di questo fatto: del resto l'esperienza comprova che gli edifizi compiuti affrettatamente (e specialmente nel caso in cui le muraglie interne sieno coperte di intonachi e di rinzaffi) e tosto occupati, si manifestano per molti mesi in condizioni eccezionalmente sfavorevoli ai riguardi acustici, condizioni sfavorevoli che vanno diminuendo a misura che le muraglie perdono la primitiva umidità. La causa di questo fenomeno non è ben chiara, nè finora, per quanto è a nostra cognizione, gli uomini competenti fornirono a tale proposito spiegazioni completamente soddisfacenti. Fra queste pertanto ci terremo a prender nota di quella fornita dal Fletcher Barrett (1), il quale, occupandosi dell'argomento in questione, così si esprime: « La ragione del fatto per cui le condizioni acustiche di un edifizio vanno migliorando mano a mano che si asciugano le muraglie deve cercarsi in ciò che l'asciugarsi delle malte rende il materiale più omogeneo e quindi viene per tal modo ad aumentarsi l'elasticità della struttura murale ». E prosegue: « Quando la malta è asciutta, essa è fino ad un certo punto fatta capace di ricevere e trasmettere vibrazioni, come non potrebbe assolutamente fare in uno stato umido, anelastico ».

Quando pertanto l'eccesso di risonanza in un edifizio sia da attri-

(1) *The Builder*. Vol. XXVII, N° 1372, pag. 402, col. III.

buirsi a questa causa, ed importi di servirsene senza ritardo ulteriore, potrà togliersi l'accennato inconveniente con tappezzerie opportunamente disposte, tappezzerie che potranno poi essere tolte quando, tolta la causa coll'andare del tempo, l'accennato inconveniente venga a cessare.

Della risonanza che presenterà l'ambiente una volta costruito deve con ogni cura preoccuparsi l'architetto, poichè, studiandosi da un lato di evitare gli eccessi tanto dannosi, egli dovrà in pari tempo cercare in ogni modo di raggiungere nella risonanza il limite estremo compatibile colle buone condizioni acustiche, e quanto maggiore essa sarà, tanto migliore riuscirà nell'ambiente stesso l'effetto della voce umana e quello in genere di tutti i suoni che in esso vengono a prodursi.

L'eccesso di risonanza il quale proviene da un eco incompleto o da piccole cavità sonore, e quello prodotto da un grosso corpo d'aria che vibri di vibrazioni proprie non sono però probabilmente della medesima natura: vi sono infatti dei casi di estrema risonanza nei quali viene esercitata una sfavorevole influenza sui suoni, mentre non è percettibile alcuna specie di eco, ma nulla può dirsi di assoluto a tale proposito: gli è nell'esame del caso particolare che l'architetto giudicherà della natura della risonanza per provvedere ai mezzi coi quali eventualmente correggerla.

I *cassettoni*, mediante i quali sono talvolta ornati i soffitti e le vôlte, le nicchie decorative, le strombature delle porte e delle finestre e gli sfondi di qualsiasi genere, presentano tutti dei volumi d'aria che vibrano di vibrazioni proprie, come fossero canne da organo, sotto l'influenza delle onde sonore eccitate nell'ambiente e vengono ad aggiungersi alla risonanza di esso, aumentando la somma dei rumori confusi.

§ V.

Eco.

L'eco è uno dei fenomeni del suono più semplici e meglio conosciuti. Le interferenze dell'eco coi suoni primitivi sono facilmente riconosciute, le cause ne sono prontamente scoperte e le forme ordinarie di esso sono completamente riducibili a leggi, quindi anche più facilmente potrà provvedersi a che per effetto di esso non se ne risenta in un ambiente la perfetta audizione dei suoni.

Dell'eco, come fenomeno di riflessione, abbiamo già avuto motivo di occuparci in generale nella prima parte del presente lavoro: proponendoci qui di entrare in alcuni particolari a questo proposito diremo anzitutto come in una sala di *forma ordinaria* l'eco si presenti di rado quando esso non sia conseguenza della riflessione da un soffitto molto elevato o da una parete situata dinnanzi o di dietro a chi parla, od in generale al centro fonico. Nel primo caso il cammino percorso dal suono, nell'andare al soffitto e nel cadere di poi, segue i due lati di un triangolo del quale il cammino diretto del suono formerebbe la base: nel secondo caso poi il suono riflesso procedendo quasi parallelamente a quello primitivo ed in ambedue i casi, come già osservammo, la differenza del cammino percorso dai due suoni fornirebbe una misura del tempo trascorso fra i due suoni percepiti dall'uditore.

La sala di lettura del Museo Britannico (1) offre un esempio singolare di eco proveniente dal soffitto. In questa sala, quando pochi sieno gli astanti, si osserva una ripetizione notevolissima. Stando nel mezzo gli echi sembrano venire dal coronamento della cupola, stando invece da una parte sembrano venire dal lato opposto. Del resto non accade di sovente che i soffitti sieno sufficientemente alti e così situati da dare origine ad echi tanto distinti: quando tuttavia tal caso si presenti esso non è senza rimedi e noi ce ne occuperemo a suo luogo.

La stessa fonte, che abbiamo testè citata, menziona un'ampia sala a vôlta in Coblentz, lunga m. 28, larga 12 ed alta 14, dove doveva tenersi un dibattimento, scopo al quale si dovette rinunziare in causa degli echi molteplici che essa presentava.

Quanto più basso sarà il soffitto, tanto minore sarà il pericolo che si produca eco, e se non possa evitarsi che esso raggiunga una certa altezza, sarà prudente disporlo in modo da non offrire superficie riflettenti tali da far piovere il suono sull'uditorio.

Per quanto si riferisce alle pareti di fronte all'oratore od alla fonte qualunque dei suoni, e che sono la causa più frequente dell'eco, dove tale inconveniente si presenti, il miglior provvedimento onde evitarlo consiste nel foggiare il muro a semicerchio: potrebbero citarsi molti esempi della utilità di tale misura; basti per tutti quello del *Free Trade Hall* di Manchester, a proposito del quale avremo motivo di

---

(1) *Architectural Publication Society's Dictionary of Architecture*, 1860, Part 10, art. *Echo*, pag. 10.

entrare in molti particolari più innanzi. Del rimanente frequenti aperture, cortinaggi, panneggiamenti ed altri mezzi consimili dovrebbero essere adottati a questo scopo: e quando l'eco si avverta dopo effettuata la costruzione, l'espediente più economico e di più sicuro risultato sarà in molti casi quello di tendere un panneggiamento di fronte alla parete, o sotto il soffitto se l'eco provenga da questo, insomma in modo tale da smorzare il suono prima che esso raggiunga la superficie riflettente.

In questi ultimi tempi però si venne applicando da varie parti un nuovo espediente onde togliere questo gravissimo inconveniente dell'eco, particolarmente nel caso in cui l'eco derivi dalla vôlta d'un edifizio, e con ottimi risultati. L'espediente stesso promette di essere adottato con vantaggio anco nei casi di estrema risonanza, dei quali abbiamo testè tenuto parola.

Esso consiste nel tendere dei fili tanto metallici che di sostanze tessili al disotto delle vôlte o del soffitto, in modo da interrompere l'onda sonora ed impedire così che venga a battere contro la superficie riflettente con abbastanza forza da dare origine ad un eco.

Dalle informazioni che ci siamo studiati di raccogliere a tale proposito, risulta che una cosiffatta applicazione risale a circa una diecina d'anni, ma il primo cenno che ne trovammo è contenuto in un articolo del signor J. M. Allen, pubblicato in due giornali americani del 1874 (1), nel quale è descritta l'applicazione dei fili metallici fatta dal Rev. Joseph P. Taylor con ottimo successo nella chiesa di S. Paolo a Brunswick (Me.), e nella Brown Memorial Church a Baltimora. L'autore dell'articolo in questione entra poi in alcuni particolari relativamente all'applicazione che del medesimo espediente venne fatta nella Asylum Hill Congregational Church ad Hartford, applicazione che, per le circostanze nelle quali fu fatta, ci sembra meritevole di speciale menzione.

L'edifizio in questione è di stile gotico: ha un abside della profondità di 17 piedi e dell'altezza di 52; il vertice dell'arco della navata si trova a 54 piedi sopra il piano del pavimento; la galleria dell'organo all'estremità della chiesa opposta all'abside ha una profondità di circa 25 piedi. Quando la chiesa era occupata dalla folla

(1) *Acoustics of public buildings. Defects and remedy* (*Scientific American.* A weekly Journal of practical information, art, science, mechanics, chemistry and manufactures. Vol. XXX. New-York. May 23, 1874. — *The Locomotive.* Vol. VII. Hartford Ct. May 1874, N° 7).

dei devoti era assolutamente impossibile intendere la voce dell'oratore in vari punti di essa; un riflettore parabolico fu dapprima messo a posto sopra il pergamo collocato nell'abside, ma non ne risentirono vantaggio se non quegli uditori che si trovavano di fronte ad esso. In seguito venne acquistato un organo e collocato nell'abside, che occupava quasi per intero, ed il pergamo fu collocato di fronte ad esso sopra una piattaforma della larghezza di circa otto piedi: la fronte della galleria dell'organo all'estremità opposta della chiesa venne munita di uno scheletro di finestra gotica, cioè col semplice telaio e senza vetri, e ciò, a quanto si asseriva, allo scopo di infrangere la colonna sonora che vibrava in questa galleria, disoccupata, indipendentemente dalla maggior colonna sonora nell'ambiente principale. Queste innovazioni migliorarono alquanto le condizioni acustiche della chiesa, ma in alcune località sussistevano pur sempre gli inconvenienti superiormente avvertiti. Si ebbe allora ricorso al Taylor, invitandolo a dichiarare se in quella condizione sarebbe stata da consigliarsi l'applicazione dei fili metallici da lui usati con successo in altre circostanze. La diagnosi del caso, così si esprime il citato articolo, era interessante. Un oratore venne collocato sul pergamo, e parecchi uditori andavano scambiandosi nei vari punti della chiesa, nei quali maggiormente avvertivasi la mancanza di nettezza nella percezione, notandone i vari effetti, e giungendo per tal modo a scoprire la causa e la sede del difetto avvertito. Fatto questo lavoro preliminare, fu decisa l'applicazione dei fili metallici. In ciò fare pertanto non si ha alcuna regola indeclinabile: ogni caso deve essere attentamente esaminato ed il rimedio deve introdursi in perfetto accordo colle circostanze da tale esame messe in evidenza. L'applicazione fatta alla Asylum Hill Congregational Church fu coronata dal più lieto successo.

Non appagandoci dei risultati consegnati nell'articolo testè citato, noi ci siamo rivolti per ulteriori schiarimenti all'autore di esso, il quale ebbe la cortesia di somministrarci gli ulteriori particolari che qui brevemente riassumiamo.

In una prima lettera il signor J. M. Allen ci scriveva: « La chiesa, nella quale faccio le mie divozioni, è di stile gotico, con una navata principale e due laterali, con archi a sesto acuto. Quando fu compiuta si verificò che essa si trovava nelle peggiori condizioni acustiche; a motivo di vari echi che si formavano, era assolutamente impossibile che tutti i devoti potessero udire distintamente il sermone e la lettura della Bibbia. Provammo ogni specie di rimedi e nessuno corrispose

quanto quello di sottili (n. 21) fili metallici tesi attraverso le imposte dell'arco centrale. Questi fili vennero collocati alla distanza di $2\frac{1}{2}$ pollici l'uno dall'altro, e bastarono a distruggere completamente l'eco ed a migliorare notevolmente le condizioni acustiche dell'ambiente. In certi casi però i fili devono essere diversamente disposti, ed in genere dovrà anzitutto trovarsi in qual parte dell'edifizio si produca l'eco e provvedere di conformità ».

In una seconda comunicazione il signor Allen ci favoriva uno schizzo relativo all'applicazione testè accennata, schizzo che riproduciamo nella fig. 11.

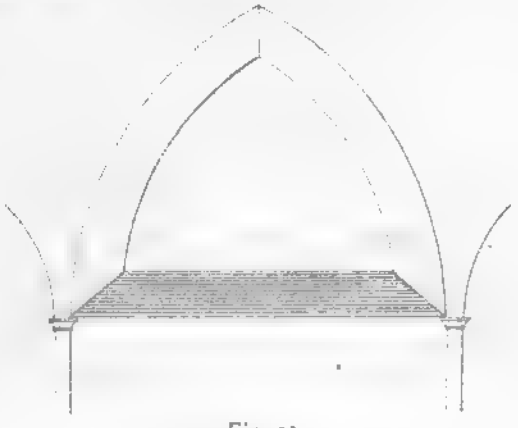


Fig. 11.

In questa nuova occasione il nostro egregio ed obbligante corrispondente ci forniva altri particolari intorno ad altre applicazioni, delle quali egli stesso era stato testimonio e che tutte erano state coronate da ottimo successo.

Lo scopo di tale applicazione pertanto essendo quello di rompere l'onda sonora prima che essa raggiunga la parete riflettente, non sembra invero assolutamente indispensabile che i fili sieno metallici (1).

(1) Tale però non sarebbe l'opinione del DOLBEAR, il quale nell'applicazione dei fili ravvisa la possibilità di raggiungere anche un altro scopo. Egli scrive infatti: — « Alcune sale e chiese sono meravigliosamente atteggiate a rendere sonora la voce e il canto. Tendendo dei fili, attraverso queste sale, fra il posto di chi parla e il lato opposto, essi assorbono le onde sonore transitanti e si mettono in oscillazione simpatica, prevenendo così a un altro grado gli echi inter-

In molte chiese dell'Inghilterra ed anche a Parigi (Église de la Madeleine), si ottennero ottimi risultati (almeno a quanto si afferma), mediante fili di cotone del diametro di due o tre millimetri, opportunamente tesi nelle località designate dalla osservazione dell'inconveniente che si mirava a togliere.

Della applicazione di questo espediente abbiamo parecchi esempi anche in Italia; noi ci contenteremo di citare l'Aula della Camera dei Deputati a Montecitorio e le sale dei Consigli Provinciali di Treviso e di Padova.

Le pessime condizioni acustiche dell'Aula di Montecitorio sono ben note, ma l'applicazione dei fili vi venne fatta con tanta leggerezza, ed in modo talmente empirico che per certo nessun buon risultato poteva attendersene da chi ha qualche pratica in questo argomento. Ed in realtà le condizioni acustiche dell'ambiente non ne rimasero per nulla affatto migliorate. Si pretese infatti di infrangere le onde sonore, nella cui riflessione si riconosceva la causa dei deplorati inconvenienti, con un solo strato di fili metallici del diametro di m. 0,0015 situati alla distanza di m. 0,79 l'uno dall'altro, incrociantisi in forma di rete ed occupanti una superficie di m. 240, all'altezza di m. 18 sul piano della platea dell'aula. Nulla abbiamo a dire intorno al diametro dei fili, ma evidentemente, per non guastare, come si allegò, l'euritmia della sala, la rete venne tesa ad una soverchia altezza, e sopratutto per la straordinaria distanza alla quale si tennero i fili l'uno dall'altro, e per non averne teso che un solo strato, l'applicazione non poteva e non doveva somministrare buoni risultati, specialmente in un ambiente di quelle proporzioni e con così gravi difetti acustici.

Un risultato poco più soddisfacente si ottenne dalla applicazione del medesimo espediente dei fili nella sala del Consiglio Provinciale di Treviso. La sala misura m. 19,20 in lunghezza, m. 10 in lar-

---

ferenti. Il filo deve essere di quello fino, da pianoforte, e teso tanto lento (*sic*) da mandare un grave suono musicale se pizzicato colle dita. In una ampia sala si dovrebbe tendere una ventina e più di siffatti fili ». (*Il Telefono. Descrizione dei fenomeni di elettricità, magnetismo e suono in esso implicati e norme per la costruzione del telefono parlante.* Opuscolo del prof. A. E. Dolbear, ecc. Firenze tip. Bencini, 1878, pag. 38). — Abbiamo dovuto contentarci di questa poco chiara traduzione, non essendo riusciti a procurarci la edizione originale, che ha per titolo: *The Thelephone: an account on the phenomena involved in its action.* By A. E. Dolbear. Boston, 1877.

ghezza e m. 11 in altezza; a m. 5 dal pavimento ricorre tutto all'intorno della sala un ballatoio, che presenta la sporgenza di 1 metro, del rimanente le pareti sono nude ed il soffitto è piano e liscio. Compiuta la costruzione si riconobbe che l'aula presentava fenomeni tali di risuonanza da rendere pressochè inintelligibile la voce degli oratori, fenomeni i quali non potevano, come dimostrò l'esperienza, essere distrutti per effetto della presenza materiale del Consiglio e del pubblico, poichè la sala è per metà occupata dalla tribuna della presidenza e dai seggi dei consiglieri, e per l'altra metà dal pubblico, che però interviene raramente numeroso alle adunanze.

Onde togliere gli accennati inconvenienti si ricorse ai fili, e poichè all'altezza di m. 5 dal pavimento ricorre, come avvertimmo, il ballatoio, se ne approfittò per collocare al disotto di esso una rete di fili di cotone del diametro di circa m. 0,003, rete le cui maglie, originariamente ad angolo retto e deformate poi dallo stiramento, offrono un lato di m. 0,12. Come ben si scorge, l'applicazione dei fili fu fatta in tal caso con maggiore discernimento che non nel caso testè riferito, tuttavia, come era da attendersi, non si potè con un solo strato raggiungere completamente l'effetto desiderato, e quindi, onde togliere del tutto i fenomeni di risuonanza, si pensò di ricorrere ad un cortinaggio in tela con cui coprire le pareti verticali all'ingiro ed al disotto del ballatoio nei giorni di adunanza; ed affinchè l'estetica di quella sala elegantissima non ne avesse a soffrire troppo, si ripeterono sul cortinaggio i dipinti che stanno sulle pareti. Col supplemento del cortinaggio si ottenne completamente l'effetto desiderato; singolare invero che anzichè ricorrere ad un nuovo espediente, quale era nel caso attuale il cortinaggio, non si sia pensato a rendere maggiormente proficuo l'espediente dei fili, che con un solo strato aveva già forniti risultati relativamente buoni. Più singolare ancora che, non ostante gli imperfetti risultati ottenuti da queste monche applicazioni dei fili, si vada sempre ricopiando il modello inefficace di un solo strato a maglie, come s'è fatto anche nella sala del Consiglio Provinciale di Padova, ma necessariamente senza alcun utile risultato.

Quivi le cose si presentavano con caratteri di gravità ben maggiore. L'altezza della sala è di m. 10,75, la larghezza media di 11, e la lunghezza di m. 15,70, o di 18 comprendendovi anche una loggia ad uso del pubblico. La grandissima sproporzione fra tali dimensioni è causa in questa sala di fenomeni di eccessiva risonanza, fenomeni resi ancor più gravi dal pavimento di legno e dal solaio

metallico che lo sostiene, e che giungono al punto da rendere inintelligibile al presidente del Consiglio la voce di un deputato che parla a due o tre metri di distanza da lui. A togliere così gravi inconvenienti si tentò d'apprima l'applicazione di leggerissime cortine di mussola alle porte ed alle finestre, ed il parziale ricoprimento del pavimento con tela. Questi espedienti rimanendo necessariamente inefficaci, si passò all'applicazione del solito strato di fili alla maggiore altezza possibile; dalla quale applicazione, come era da attendersi, non si ritrasse vantaggio di sorta.

Cade qui in acconcio, a proposito dell'eco, di riferire intorno ad alcune ricerche sperimentali del più volte citato Scott Russell, relativamente ai fenomeni di riflessione nelle sale a pianta rettangolare. Egli avrebbe infatti trovato che le onde sonore generate in un punto S (fig. 12) di una sala ADEF e riflesse nella porzione di parete AB sino ad un angolo di 45° con AF producono confusione, fra B e C sino ad un angolo di 57° sono sopportabili, e da C in poi per un angolo maggiore di 57° non hanno valore sensibile. E, se si considerano gli angoli di incidenza, si ha che per un angolo di 45° si genera confusione, per uno di 33° un effetto accettabile, e per un angolo minore di 33° si ottiene la limpidezza del suono diretto. Uguali risultati, secondo quanto riferisce il Basile (1), si sono esperimentati per le vôlte e per i soffitti.

Fig. 12.

Avviene talvolta nelle sale di forma esattamente rettangolare che una persona, stando in uno degli angoli, avverta un eco assai spiacevole quando i suoni vengano prodotti nell'angolo diagonalmente opposto: in questo caso il suono è apparentemente riflesso due volte, e due di questi echi doppiamente riflessi vengono uditi ad un tempo. Il cammino probabilmente percorso dal suono è segnato nella fig. 13,

(1) *Atti del Collegio degli Ingegneri ed Architetti in Palermo.* Fasc. 1°, ottobre 1878. — Palermo, 1878, pag. 24.

dove in S si suppone il centro fonico ed in U la persona che ascolta. Negli ambienti di simil genere, specialmente se la dimensione in lunghezza supera di molto quella in larghezza, si ode bene spesso una specie di eco squillante assai disaggradevole in vicinanza ai due angoli più lontani, e talvolta in vicinanza a tutti e quattro gli angoli, anche se l'oratore sia collocato nel mezzo; in tal caso il fenomeno è dovuto alla riflessione di quella porzione del suono che viene condotto. In questi ambienti, come lo mostrano le linee punteggiate della fig. 14, una porzione del suono viene condotta lungo il muro di fondo e lungo ciascuno dei muri di fianco, e tanto nell'un caso, quanto nell'altro, incontrerà una superficie riflettente ad angoli retti, che lo farà nuovamente tornare lungo lo stesso muro, con grande disagio degli uditori che occupano quegli angoli.

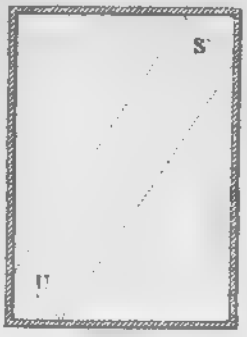


Fig. 13.

Un simile eco può intervenire quando un soffitto si congiunga con un muro ad angolo retto. Il miglior mezzo per evitare questi difetti, i quali si presentano in taluni ambienti, che del resto sono in ottime condizioni acustiche, consiste nello smussare gli angoli e nel raccordare mediante curve le pareti al soffitto. Sarà inoltre conveniente, e spesso vantaggioso, il collocare porte di ingresso ai due angoli più distanti dal luogo dove il suono viene generato, od in qualche modo consimile interrompere la superficie piana in prossimità agli angoli medesimi.

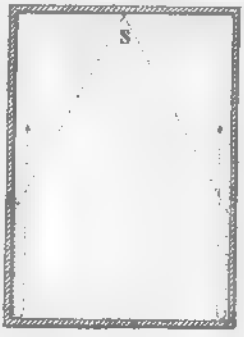


Fig. 14.

Fra gli echi divenuti famosi e dei quali tengono parola pressochè tutti i trattati speciali, alcuni sono rimarchevoli per il numero di volte che ripetono un suono, altri per l'intervallo di tempo che trascorre prima che vengano percepiti, permettendo così di pronunziare parecchie sillabe, le quali vengono più o meno fedelmente ripetute, altri infine, come abbiamo già incidentalmente avvertito, ripetono i suoni con trasposizioni od in genere con alterazioni; ma lo studio di questi casi particolari non può essere di alcuna importanza per la pratica. Per quanto si riferisce a quegli echi che riproducono più

volte un suono, noi ci limiteremo a dire che in generale si troveranno prodotti da una combinazione di due o più superficie riflettenti, così disposte rispettivamente che il suono rimane per così dire palleggiato dall'una all'altra prima che ne resti esaurita la forza, per modo che chi voglia avvertire questa specie d'eco dovrà collocarsi attraverso la via percorsa dal suono.

Prima di chiudere questo capitolo relativo agli ostacoli che si oppongono alla uniforme diffusione del suono negli edifizi, avvertiamo espressamente che fra questi ostacoli non abbiamo di proposito annoverato la mancanza di buone proporzioni e la forma disadatta dell'ambiente, e ciò non già perchè tali cause sieno senza influenza sulle condizioni acustiche di esso, ma bensì perchè l'influenza esercitata da tali circostanze riveste ordinariamente i caratteri di una o dell'altra delle cause che abbiamo in particolare studiate.

Così, per modo di esempio, la mancanza di buone proporzioni in una sala può essere causa di un eccesso di risonanza e quindi nuocere alla *distinta* audizione: una forma disadatta può essere causa di ambedue questi inconvenienti ed anche di altri degli ostacoli enumerati, mentre d'altra parte non può nascondersi che le proporzioni e la forma costituiscono due fra gli elementi principali del successo sotto il punto di vista acustico. Noi ci contenteremo tuttavia qui di questo semplice cenno, riservandoci di approfondire la discussione di questi argomenti comprendendoli fra i mezzi, mercè i quali può venirsi in aiuto alla propagazione ed alla uniforme diffusione dei suoni.

CAPITOLO II.

DEI MEZZI COI QUALI PUÒ VENIRSI IN AIUTO ALLA UNIFORME PROPAGAZIONE ED ALLA DISTINTA PERCEZIONE DEI SUONI.

---

§ I.

GENERALITÀ.

La forma, i materiali, le proporzioni e le dimensioni di un dato ambiente possono esercitare una influenza favorevole alla uniforme propagazione ed alla distinta percezione dei suoni:

1° Coll'impedire la dispersione delle ondulazioni.

2° Coll'imprimere ad esse una certa direzione iniziale e col coadiuvarne il progresso, quando tale direzione sia già posseduta.

3° Col rinforzare il suono.

Risalendo alle cause, i due primi effetti sono da attribuirsi alla riflessione ed alla condotta del suono, il terzo alla risonanza.

Noi passeremo dapprima in rassegna le tre azioni dei corpi riflettori, conduttori e risuonanti, e quantunque il perfetto risultato, al quale si mira, sia da attribuirsi ad una felice combinazione nella quale ciascuno degli elementi contribuisce per la parte sua, tuttavia tornerà opportuno il formarsi un'idea del modo di agire di ciascuno di essi isolatamente considerato.

Torna quasi superfluo l'avvertire che, trattando di questo argomento, noi assumeremo che gli ostacoli dei quali ci siamo finora occupati nella seconda parte del presente lavoro sieno stati, per quanto era possibile, superati in modo da assicurare all'uditorio tanto suono quanto esso ne percepirebbe per effetto di naturale propagazione.

Tre strumenti comunissimi ci forniranno esempi dei tre modi di

agire che dovranno considerarsi come tipi ai quali riferirci. Tali sono il *violino*, il *porta-voce* ed il *riflettore* (1).

Ognuno di questi strumenti riposa sopra l'applicazione di un principio d'acustica ben distinto, e la influenza che può esercitarsi vantaggiosamente sul suono deve sempre essere riferita al modo di agire di uno fra essi.

L'azione del violino è un esempio di pura risonanza, quello del porta-voce di pura condotta, finalmente quello del riflettore, come il nome stesso lo dice, di pura riflessione.

Alla forma di un ambiente dee principalmente aversi riguardo per la favorevole direzione che può venire impressa ai suoni, o per mantenerli in essa, od in altre parole, per vantaggiosa riflessione e condotta: egli è ai materiali e talvolta alla massa d'aria nell'ambiente compresa e tal' altra anche alle masse d'aria contenute nei locali ad esso circostanti, che deve aversi riguardo per ottenere una vantaggiosa risonanza.

Esaminiamo quindi dapprima quale aiuto può porgere la forma di un ambiente alla diffusione del suono e cominciamo dalla riflessione favorevole.

§ II.

Della riflessione.

Richiamandoci alle leggi che governano la riflessione del suono, e ricordando insieme le circostanze nelle quali questa riflessione può produrre l'eco, non ci sarà d'uopo spendere parola alcuna per provare che favorevoli riflessioni non possono attendersi nè da muraglie, nè in genere da superficie che vengano a trovarsi al di dietro dell'uditorio, nè da qualsiasi superficie lontana ad un tempo dall'uditorio e dal centro fonico. In generale, un suono riflesso non può giungere all'orecchio di uno che ascolta, nel tempo istesso che il suono

(1) Abbiamo già avvertito nella prefazione quanto largamente abbiamo ricorso alla pregevolissima opera dello Smith ivi citata: a questo punto, seguendola noi forse più fedelmente che altrove, crediamo opportuno di ricordare la precedente dichiarazione.

diretto, e per conseguenza con tutti i mezzi che si possono impiegare per ottenere la riflessione, si arrischia di perdere in *distinzione*: rischio pertanto che talvolta torna prudente di correre piuttosto di rinunziare al notevole rinforzo che al suono può derivare dall'impiego di una superficie riflettente opportunamente disposta. Questa mancanza di distinzione o di nettezza sembra aumentare quanto più duro e levigato è il riflettore, e quindi comunemente accade che se un oratore sia collocato di fronte ad una larga superficie murale, senza soluzione di continuità, e ricoperta di duro stucco, l'effetto prodotto dalla voce torni effettivamente sgradito, avvenendo una specie di eco squillante, che vien percepito subito dopo il suono primitivo, ma troppo definito e distinto per mescolarsi con esso, e quindi eminentemente atto ad ingenerare confusione.

Tali superficie riflettenti, o riflettori che dir si vogliano, perchè verosimilmente riescano di impiego vantaggioso, devono consistere in acconcie superficie disposte in vicinanza al centro fonico e si presteranno tanto maggiormente allo scopo se costituite di materiali risuonanti.

Le superficie a sezione parabolica furono sempre preferite nella forma da assegnarsi ai riflettori per parte di coloro che prestano maggior attenzione alla teoria del suono, più o meno giustamente interpretata, di quello che alla esperienza, come in tutto, qui pure arbitra suprema, e ciò sotto pretesto che la forma parabolica possiede la proprietà di riflettere in un fascio parallelo tutti i raggi che, procedendo dal fuoco, cadono da ogni parte della sua superficie interna. Lo stesso Chladni, enunciando la cosa come una opinione sua propria, scrive (1): « Allorquando si tratti di intendere dovunque e distintamente un oratore, o un cantante, o uno strumento, una forma parabolica delle pareti e del soffitto sarà convenientissima; si potrebbe far terminare i due rami della parabola in rette parallele: il suono dovrebbe esser prodotto nel fuoco della parabola, e tutto quello che non giunge direttamente all'uditorio, perverrebbe riflesso in direzioni parallele all'asse ».

Queste idee furono condivise da molti altri scrittori, ed un riflettore parabolico concavo, col centro fonico nel fuoco, fu considerato, potremmo quasi dire in generale, come un mezzo infallibile per aumentare l'intensità dei suoni. Fortunatamente, a questo proposito ab-

---

(1) *Die Akustik*. Leipzig, 1802, § 210.

biamo dei risultati d'esperienza completi e bene accertati, i quali permettono di fissare assolutamente le idee a tale riguardo, e questi risultati concorrono a provare che, quantunque con cosiffatto espediente venga ad ottenersi un considerevole rinforzo del suono, pure gli svantaggi concomitanti sono tali da superare in buona parte dei casi i benefizi che dal riflettore, nelle condizioni accennate, possono attendersi.

Di questi esperimenti è reso conto in un raro opuscolo pubblicato a Londra nel 1829 (1), nel quale si contiene la descrizione di un riflettore parabolico costruito da un ecclesiastico, il rev. John Blackburn, nella sua chiesa ad Attercliff, in vicinanza di Sheffield. La relazione è ben fatta, chiara e precisa, ed è completata dall'estratto d'una memoria comunicata dal medesimo autore alla *Society of Arts* di Londra, che la inserì nel volume XLVIII dei suoi *Transactions* (1830-31). Da queste fonti si raccoglie che la chiesa era di recente costruzione; l'area interna formata da un rettangolo di 95 piedi per 72, con un vano ad est di 10 piedi per 32; il tetto a vôlta col punto più alto della navata a circa 56 piedi dal pavimento; la chiesa inoltre ha gallerie tanto laterali quanto all'estremità ovest.

Allorchè si cominciò a servirsi della chiesa di fresco costruita, si trovò che presentava una estrema risonanza, ed i suoni in essa prodotti riuscivano talmente confusi ed indistinti che, per quanti sforzi facesse l'oratore, non riusciva mai ad essere inteso. Il primo espediente al quale si ebbe ricorso fu quello di mutare la posizione del pergamo, il piano del quale si trovava a circa 9 piedi dal pavimento: fu provato in varie posizioni, e la meno cattiva si trovò essere quella della navata di mezzo, a 15 metri di distanza dalla balaustrata dell'altare; ma tuttavia gli inconvenienti non erano completamente tolti di mezzo (2). Si tentò la applicazione di un riflettore piano ordinario e ne risentirono un qualche benefizio gli uditori i cui seggi erano immediatamente collocati sotto il pergamo, cioè dove relativamente se ne aveva minor bisogno, ma in generale, scrive il Blackburn: « gli effetti ne erano così decisamente svantaggiosi che si dovette abbandonarlo ».

---

(1) *Description of a Parabolic sounding-board erected in Attercliff Church* by the Rev. JOHN BLACKBURN M. A. London, 1829.

(2) Alcuni particolari intorno a questi esperimenti trovansi in una memoria di W. FLETCHER BARRETT intitolata: *Acoustics and Buildings* ed inserita per estratto nel giornale *The Builder* del 22 maggio 1869, pag. 402-404.

Lo scopo che si desiderava di raggiungere era quello di rendere il suono distintamente percettibile nelle parti della chiesa più discoste dal pergamo, e ritenendo che ciò avrebbe potuto ottenersi coll'intercettare quel suono che sfuggiva all'indietro e quello ancora che andava disperdendosi nella parte dell'ambiente sguernita di uditori, imprimendo ad esso una direzione rettilinea, si pensò che un riflettore parabolico avrebbe potuto essere opportunamente applicato. Il Blackburn infatti decise di tentare la prova, ed afferma che il risultato sorpassò di molto la aspettazione e le speranze. Si constatò infatti che dopo la collocazione in opera del riflettore, gli astanti nelle gallerie estreme « udivano anche meglio di quelli che si trovavano in vicinanza al pergamo, ma lateralmente », ed infatti le difficoltà di parlare e di udire sembravano felicemente e completamente superate.

Il riflettore fu costruito con ogni cura in legno di pino e fu collocato coll'asse inclinato in avanti verso il piano del pavimento di un angolo da 10 a 15 gradi, e disposto per modo che la bocca dell'oratore venisse a trovarsi nel fuoco.

La memoria presentata alla *Society of Arts* era accompagnata da un modello, che è ancora visibile nella collezione dei modelli di Filosofia Naturale nella Università di Londra, e dalla ispezione di questo modello, come dalle incisioni inserite nell'opuscolo, si trae che il riflettore doveva riuscire di ingombro al pergamo, difetto questo per altro che avrebbe potuto evitarsi quando nessun altro ostacolo si fosse opposto all'impiego di tale spediente.

La pubblicità data per tal modo a siffatto esperimento, che si asseriva coronato da successo, esperimento intorno al quale venne anche fatta una comunicazione alla Società Reale di Londra, indusse ad approfittare dello spediente anche in altre Chiese. Fra le prime nuove applicazioni deve annoverarsi quella fatta a Cambridge dal prof. Farish, il quale comunicò in appresso alla *Society of Arts* non esservi parte alcuna della sua Chiesa, nella quale il suono non fosse più intenso che innanzi al collocamento del riflettore; ma che il maggiore vantaggio si era risentito da quella parte dell'uditorio che si trovava alla maggiore distanza e ciò per modo tale che le parti della Chiesa più discoste dal pergamo erano quelle nelle quali meglio si udiva. Si potrebbero citare oltre a trenta esempi di consimili applicazioni di riflettori parabolici, senza tener conto di una nuova Chiesa a Darnall, pure in vicinanza di Sheffield, dove il riflettore parabolico fu costruito fin da bel principio in muratura.

Di mano in mano che l'uso del riflettore parabolico si andava e-

stendendo, esso perdette del favore che aveva accompagnato il suo primo apparire; e così quello originale, costruito ad Attercliff, come gli altri, vennero per la massima parte, in capo a poco tempo, abbandonati: le più gravi obbiezioni contro il loro impiego essendo che l'oratore udiva l'eco della sua propria voce in modo straordinario, mentre ancora era molestato dall'udire i più deboli suoni prodotti nell'uditorio e perfino i più sommessi bisbigli sussurrati da coloro che occupavano le parti estreme della Chiesa, rumori che gli pervenivano come raccolti da un grande orecchio ed aumentati di intensità in modo che il più lieve di essi riuscivagli percettibile. Questo inconveniente riusciva talmente intollerabile agli oratori, che buona parte di essi rifiutarono assolutamente di salire un pergamo munito di riflettore parabolico.

Inoltre, dalle osservazioni fatte in tale circostanza, risultò che del benefizio recato dall'apparecchio non potevano approfittare se non quegli oratori, che avevano l'abitudine di starsene immobili sul pergamo, poichè il minimo spostamento della bocca dal fuoco del riflettore era causa di una corrispondente diminuzione nel volume del suono riflesso, e finalmente la esperienza provò che se il riflettore collocato nella Chiesa di Cambridge riusciva realmente di vantaggio agli uditori situati in tutte le varie parti dell'ambiente, lo stesso non avveniva nelle altre applicazioni, poichè per esempio nella chiesa di S. Filippo a Sheffield, essendosi usato per qualche tempo di uno di questi riflettori, si dovette poi abbandonarlo giacchè quantunque esso esercitasse una benefica influenza in favore di quelli che si trovavano di fronte all'oratore, lo stesso non poteva dirsi per quelli che si trovavano di fianco, locchè indurrebbe a ritenere che probabilmente l'apparato tornerebbe assai più opportuno in un ambiente stretto e lungo che non in uno ampio in confronto della lunghezza. Non è poi assolutamente fuori di luogo il pensare che i vantaggi ottenuti nella Chiesa di Attercliff, dove il riflettore parabolico fu originariamente introdotto e dove lo si trovò da principio indispensabile, sieno in ultima analisi da attribuirsi a cause ben diverse dalla introduzione del riflettore: può darsi cioè che da principio il bisogno di venire in aiuto alla voce dell'oratore derivasse dallo stato di umidità delle pareti appena costruite e che poi questo bisogno fosse andato mano a mano diminuendo e che quindi le migliorate condizioni acustiche dell'ambiente fossero da attribuirsi al prosciugamento delle muraglie. Questa però non è che una nostra ipotesi, mancando assolutamente gli elementi per giudicare se e fino a qual punto essa trovi fondamento nella realtà dei fatti.

Nei suoi generali risultati lo sperimento, del quale si è tenuto finora parola, sembra mostrare che mentre deve porsi fuori di dubbio una straordinaria potenza nei riflettori parabolici di spingere la voce ed in genere il suono in una direzione determinata in tutti casi nei quali possono venire applicati, è per contrario limitatissimo il numero dei casi nei quali tale applicazione può essere fatta con vantaggio; ma v'ha di più: un riflettore parabolico, ove se ne trovi opportuna la introduzione, non deve essere adottato come parte integrante della costruzione; ma, ogniqualvolta si creda di doversene servire, deve possibilmente consistere in un pezzo provvisorio in modo che possa essere tolto a piacimento.

Una ingegnosa applicazione del riflettore fu fatta, posteriormente all'epoca alla quale si riferiscono gli anzidetti esperimenti, dal signor Penrose nella cattedrale di San Paolo di Londra, dove essendosi stabilito un pergamo provvisorio nella parte centrale della Chiesa, per il servizio di certi esercizi religiosi, si riconobbe tosto che l'eco riflesso dalla cupola riusciva di gravissimo incomodo tanto all'oratore quanto all'uditorio e che si rendeva necessario un rimedio a tale inconveniente.

Si adottò quindi un riflettore metallico e precisamente costruito collo stesso metallo che si usa per le canne da organo, gli si assegnò un diametro di circa tre metri, la sezione iperbolica e lo si fissò sopra il pulpito in posizione orizzontale. Si chiedeva anzitutto al riflettore di intercettare il suono diretto e procedente all'insù verso la cupola, ed inoltre che il suono stesso venisse ad essere proiettato sopra porzione dell'uditorio. E questi obbiettivi sembrano invero essere stati raggiunti. Un risultato rimarchevole attribuito dall'architetto a questo riflettore consiste in ciò che ad una piccola elevazione sopra il pavimento, per esempio in una delle gallerie laterali, la voce dell'oratore non era così bene intesa come lo era invece da persone che si trovavano alla medesima distanza, ma sul piano del pavimento, non ostante il vantaggio di cui avrebbero dovuto godere gli uditori delle gallerie per il fatto che il suono arrivava direttamente a loro senza essere turbato dalla folla più vicina al pergamo.

È mestieri osservare pertanto a questo proposito che la applicazione del riflettore fatta in quest'ultimo caso va esente dalle obbiezioni giustamente sollevate contro il riflettore parabolico di Blackburn: esso non impedisce la percezione del suono alle persone che si trovano di dietro ed ai lati del pergamo, non una delle vibrazioni sonore che giungono ad esso viene riflessa contro l'oratore ed ancora

il riflettore di Penrose non impone la condizione che chi parla, per essere ben udito, deva starsene immobile in un punto determinato del pergamo. Queste considerazioni rendono il riflettore iperbolico degno di speciale attenzione.

Il riflettore parabolico ha poi ricevuta ancora una applicazione assai rimarchevole agli Stati Uniti e precisamente nelle prigioni della Contea di Berks, dove fu adoperato per impedire la trasmissione del suono. Da quanto ci fu dato di raccogliere a tale proposito (1), in questa prigione costruita secondo il sistema cellulare si presentò il bisogno di impedire la possibilità di comunicazione fra i carcerati, per ciò che quantunque non fosse possibile la trasmissione della voce attraverso le muraglie, quei prigionieri avevano trovato modo di comunicare fra loro mediante i tubi degli apparecchi di ventilazione. Vi erano due di tali tubi in ogni cella, uno comunicante col canale interno dell'aria, l'altro coll'esterno: ora non si comprende abbastanza bene il modo esatto con cui fu ovviato all'inconveniente, essendo riferito che: « two enlargements are made in the flues 10 feet apart », probabilmente però si volle con ciò far intendere che furono praticati due allargamenti di sezione in ognuno dei due tubi e che in ciascuno di essi venne fissata, come seguita a dire la fonte citata ed alla quale ci riferiamo, una superficie riflettente di terra cotta avente la forma di un paraboloide. Non è poi specificato in quale direzione sia stato fissato l'asse del riflettore, è probabile però che esso fosse parallelo a quello del tubo e che la concavità del riflettore medesimo fosse rivolta verso l'estremità del tubo dal quale proveniva o poteva provenire il suono. Il risultato di tale applicazione fu un perfetto isolamento acustico delle celle, riuscendo dopo di essa impossibile di udire attraverso i tubi in una cella il più forte rumore fatto nell'altra. Il costo di tale applicazione fu, a quanto si asserisce, estremamente tenue (2).

---

(1) *The Builder* for 1847, pag. 618.

(2) Un inconveniente affatto simile a quello testè narrato si verificò durante l'inverno 1879-1880 nel Carcere cellulare di Milano. L'architetto di quel grandioso edifizio, invitato a suggerire un rimedio, propose di applicare ai condotti del calore certe griglie in ferro allo scopo di intercettare il suono: questo rimedio venne applicato, ma senza alcun vantaggio, come del resto poteva facilmente attendersi, anche prima di farne l'esperimento. Quando noi visitammo il carcere cellulare di Milano nel maggio 1880, allo scopo di togliere il deplorato inconveniente, si pensava nientemeno che a mutare radicalmente il sistema di riscaldamento!

In circostanze ordinarie tuttavia un riflettore piano si troverà assai più vantaggioso di qualsiasi altro: infatti quantunque la sua azione sia moderata, pure presenta il vantaggio della uniformità di riflessione: la più comoda posizione sarà al di sopra dell'oratore con una lieve inclinazione all'ingiù, per esempio da 20 a 30 gradi. Questa posizione è indubbiamente preferibile; ma quand'anche il riflettore si collocasse orizzontale, potrà tornare ancora di utilità, specialmente se sia richiesto di proiettare il suono di fronte alla posizione del centro fonico. I riflettori comunemente collocati sopra i pergami, sempre vantaggiosi e spesso indispensabili, sono nella quasi totalità piani ed orizzontali.

Il materiale col quale costruire il riflettore è un elemento, ben lo si comprende, di grande importanza per determinare l'entità del beneffizio che se ne potrà attendere. Nel *Surrey Music Hall,* a proposito del quale avremo motivo di entrare più innanzi in maggiori particolari, fu stabilito un ampio riflettore un po' inclinato all'insù e che copre la intera orchestra. Si giudicò tale provvedimento assai favorevole alle buone condizioni acustiche di quell'ambiente e si prescrisse di costruirlo di legno bene stagionato e perfettamente secco. E in questo caso, trattandosi di rinforzare suoni musicali, crediamo anche che l'uso del legno bene stagionato e perfettamente secco possa essere suggerito; ma allorquando si tratti di rinforzare la voce, o per dirla più esattamente, la parola, noi crediamo che l'impiego d'un materiale il quale può contribuire ad aumentare la risonanza ed a far percepire la voce dell'oratore con un certo accompagnamento deve assolutamente proscriversi. Trattandosi pertanto di venire in aiuto alla propagazione della parola mediante riflessione, è nostro avviso che sia da darsi la preferenza a superficie di ripercussioni liscie, pulite e sopratutto costruite di materiali perfettamente resistenti e preferibilmente di marmo.

Per ora ci limitiamo a questo semplice cenno, riservandoci di tornare sull'argomento nella terza parte del presente lavoro, quando cioè avremo motivo di occuparci di proposito delle Chiese e dei modi concreti con cui assicurare ad esse buone condizioni acustiche.

In tali disposizioni è pertanto mestieri por mente a che le superficie sieno collocate in modo da non proiettare il suono sopra una seconda superficie, la quale si trovi al di dietro o al disopra dell'uditorio, dalla quale il suono venga nuovamente riflesso, e ciò allo scopo di evitare le eventualità dell'eco od una confusione dei suoni.

§ III.

Direzione e condotta del suono.

La direzione e la condotta del suono, considerate cumulativamente con una riflessione favorevole, possono riuscire di notevole vantaggio alle condizioni acustiche di un ambiente ed implicano che una porzione di quel suono, la quale avrebbe potuto disperdersi senza vantaggio per un uditorio, sia avviata in direzione favorevole, in modo che al suono tanto riflesso quanto direttamente propagato sia libera la via a dove si vuole che esso sia percepito, e che la forma dell'edifizio sia tale da permettere non solo che esso raggiunga determinati punti, ma altresì da guidarlo spianando ad esso la via.

Torna assai difficile e fors'anco non assolutamente necessario dare regole per la condotta del suono, e noi dovremo e potremo starcene paghi ad alcuni principi generali, la cui applicazione a casi speciali deve essere per buona parte lasciata al criterio dell'architetto.

Nell' introduzione teorica al presente lavoro noi ci siamo già occupati della condotta del suono in generale, quando ne venga impedita la dispersione laterale (1): ora gli è precisamente a questa causa che deve attribuirsi l'effetto prodotto dai così detti porta-voce. L'azione di questi strumenti fu per lungo tempo attribuita alla riflessione del suono, secondo le idee sviluppate dal Lambert nella sua teoria dei porta-voce, pubblicata nel 1763, teoria che adottarono in seguito pressochè tutti i trattatisti di fisica. Si poneva per principio che scopo dello strumento era quello di rendere i raggi sonori paralleli all'asse del tubo, e si cercò la forma più adatta ad ottenere questo parallelismo. Ora nulla è meno conforme ai fatti osservati, come dimostrò fino all'evidenza l' Hassenfratz in una memoria presentata all' Istituto di Francia (2). Secondo la teoria che attribuisce l'effetto dei porta-voce alla riflessione, quale fu sviluppata dal Lambert, un tubo cilindrico non

---

(1) Pag. 18-20.

(2) *Mémoire sur la propagation du son* par J. H. Hassenfratz. Nei *Mémoires présentés à l'Institut des Sciences, lettres et arts par divers Savants et lus dans ses assemblées. Sciences Mathématiques et Physiques.* Tome second. Paris, 1811, pagine 101-109.

eserciterebbe alcuna influenza, mentre, come risulta dalle esperienze dell'Hassenfratz, la battuta di un orologio, che cessava di essere intesa a 1^m, 1 di distanza, lo era ancora a 2^m, 25 quando si collocava l'orologio all'estremità di un tubo cilindrico di di 0^m, 6 di lunghezza, e di 0^m, 04 di diametro. Ed anche indipendentemente da speciali esperienze, un esempio dell'efficacia dei tubi cilindrici per la condotta del suono noi lo abbiamo nelle condotte del suono per tubi stabilite negli edifizi delle grandi amministrazioni ed anche in abitazioni particolari, condotte le quali erano tanto in voga in alcuni paesi prima dell'invenzione del telefono, e che, nel caso in cui le distanze alle quali si vuol far pervenire il suono non superino i venticinque o trenta metri, tornano ancora di conveniente applicazione. Un tubo cilindrico, munito di padiglione svasato, può servire del resto ottimamente come porta-voce, il padiglione contribuendo al rinforzo del suono, mentre Lambert lo aveva giudicato un accessorio inutile. Finalmente lo stesso Hassenfratz provò che foderando d'una stoffa di lana l'interno d'un porta-voce di rame non ne rimaneva diminuito l'effetto che in modo appena sensibile, mentre se gli effetti di esso fossero stati da attribuirsi alla riflessione, il fatto del rivestimento in lana avrebbe dovuto impedire, o quasi, qualsiasi riflessione sulle pareti interne del tubo.

Si opina da taluni che il rinforzo del suono dipenda esclusivamente dalla forma geometrica della colonna d'aria dalla quale parte il primo impulso: ma non crediamo che la teoria abbia ancora rivelato in qual modo questa influenza venga ad esercitarsi. Si può dire soltanto che il tubo del porta-voce contiene le onde sonore, impedisce loro di disperdersi in tutti i sensi: ed è senza dubbio quest'idea che ci guida istintivamente quando, volendo che la nostra voce pervenga a grande distanza, facciamo un porta-voce colle mani, accostandole alla bocca. È noto inoltre che gli antichi adattavano alle maschere degli attori una specie di padiglione, che faceva l'effetto d'un porta-voce; ma su queste maschere torneremo più innanzi quando ci occuperemo in particolare dei teatri presso gli antichi.

Ritornando alle esperienze di Hassenfratz notiamo ancora essersi trovato che, mentre variazioni nella forma del porta-voce ne influenzano la potenza, la materia della quale è costituito può essere cangiata senza che se ne risenta notevolmente l'effetto dello strumento. La conclusione a cui pervenne lo sperimentatore si fu che l'aria contenuta nella capacità interna dello strumento viene compressa dagli impulsi del corpo sonoro assai più vigorosamente che non se le pa-

reti venissero a mancare: ogni molecola riceverebbe quindi una maggior ampiezza di vibrazione in quella direzione nella quale essa è libera di muoversi e perciò diverrebbe capace di trasmettere questa azione a maggior distanza.

Delle varie forme da darsi ai porta-voce non è questo il luogo di trattare, chi volesse vederne una collezione assai ricca potrà consultare l'opera già citata del Kircher (1); ma limitandoci noi a considerare la forma che ordinariamente esso riceve, non v'ha dubbio ch'essa sia sommamente adatta a condurre il suono senza dispersione laterale.

Un ambiente della forma d'un grande porta-voce non sarebbe certamente di pratica ed utile costruzione; ma però non si può a meno dal riconoscere che se esso fosse costruito in modo da presentare pareti divergenti in vicinanza al centro fonico, ed un soffitto ascendente, rassomiglierebbe abbastanza ad un porta-voce che terminasse in un tubo a sezione rettangolare e ad asse rettilineo per favorire la propagazione del suono. Nell'adottare le pareti divergenti ed il soffitto ascendente si otterrebbe ancora un altro vantaggio, poichè, come fu già esposto a suo luogo, verrebbe per tal modo a ridursi notevolmente lo spazio di dietro e di sopra del luogo nel quale il suono fu generato. Se queste idee fondamentali sono esatte, ne conseguirebbe che quando in un edifizio si devono eccedere i limiti della naturale propagazione del suono, il centro fonico dovrebbe collocarsi in vicinanza ad una estremità dell'ambiente, facendone dipendere la disposizione dal doppio scopo al quale si deve mirare: anzitutto quello di impartire al suono una certa direzione iniziale e poi di condurlo in quella direzione. Per tal maniera qualsiasi ambiente di grandi proporzioni, per essere in buone condizioni acustiche, dovrebbe avere una delle sue dimensioni decisamente predominante su tutte le altre, e questa dimensione dovrebbe essere la lunghezza, poichè *non si può estendere in ogni senso un ambiente senza che tosto esso divenga così vasto da far sì che il suono vi si perda; ma si può con tutta sicurezza estenderlo, naturalmente entro certi limiti, in quella direzione nella quale procede il suono.*

---

(1) Athanasii Kircheri, *Phonurgia nova, sive conjugium mechanico-physicum*, ecc. Campidonae, 1672, pag. 124-138. — Per la storia dell'argomento veggasi la notevolissima lettera di Paolo Aproino a Galileo in data di Treviso, 27 luglio 1613 (*Le opere di Galileo Galilei*, prima edizione completa. Tomo viii. Firenze, 1851, pag. 276-282). Singolare a dirsi: delle importantissime esperienze registrate in questa lettera non abbiamo trovata menzione in alcuno dei molti trattati di fisica da noi esaminati.

Venendo poi a parlare di proposito della forma del soffitto, nel caso in cui questa sia piana, abbiamo già osservato come non sia da consigliarsi di farlo incontrare ad angolo retto colle pareti. Un soffitto piano ad angoli smussati, o raccordato a curva colle pareti, sembra offrire il vantaggio di versare, per così dire, sull'uditorio quel suono che altrimenti, o andrebbe per esso perduto, o non vi arriverebbe che dopo una doppia riflessione. La forma ellittica era un tempo raccomandatissima; Gibbs, uomo molto sperimentato, descrivendo una chiesa da lui costruita, così si esprime: « il soffitto è ellittico, forma che per esperienza ho trovato molto migliore della semicircolare per soddisfare alle esigenze di una buona audizione, quantunque non altrettanto soddisfacente sotto il punto di vista estetico ». Questa forma fu ripetutamente impiegata da Wren e da altri architetti e non solo per edifizi di uso esclusivamente ecclesiastico; e, per quanto può giudicarsi dalle relazioni che se ne hanno, gli effetti ne sarebbero anche stati soddisfacenti: quindi, dove la cosa sia ammissibile, potrà essere presa in considerazione come assai probabilmente vantaggiosa.

§ IV.

Della risonanza degli ambienti.

Degli inconvenienti di un eccesso di risonanza abbiamo già tenuto parola trattando degli ostacoli che si oppongono alla propagazione ed alla distinta percezione dei suoni, però anche prima che questo eccesso si verifichi, diminuisce la *distinzione* o nettezza loro, e di qui appunto deriva la differenza fra il grado di risonanza, che può prudentemente ammettersi nei diversi edifizi, grado di risonanza che potrà essere maggiore o minore a seconda della destinazione dell'edifizio.

Quando, per la prima volta, toccammo di questo argomento, accennammo al violino come allo strumento musicale, il quale riposa particolarmente sulla risonanza ed a cui si potrebbe riferirsi come ad un mezzo per investigare, per via di analogia, l'azione del principio sul quale esso si fonda.

Fu già osservato che il violino, ed in genere tutti gli strumenti a corda, consistono in un corpo risuonante ed in una serie di corde

musicali, e dipendono per le loro buone qualità dalle vibrazioni simpatiche eccitate nel corpo risuonante dalle corde: tutte le parti del corpo del violino vi concorrono assieme alla massa d'aria in esso racchiusa. Sono due quindi gli elementi che dallo studio di questo strumento ci vengono segnalati ed ai quali deve aversi speciale riguardo: vale a dire la risonanza dei materiali e quella della massa d'aria, ed a questo proposito non sarà fuori di luogo lo studiare comparativamente la influenza esercitata sul suono dalla risonanza con quella che esso risente per effetto della riflessione o della condotta.

Prendiamo un corpo sonoro qualsiasi, p. e. un orologio o una cassetta musicale, e, dopo aver notata la distanza alla quale ne è percettibile il suono all'aria aperta, poniamolo successivamente nell'imboccatura d'un porta-voce, nel fuoco d'un riflettore parabolico e sopra un violino o sopra un pianoforte, si troverà che le tre specie di strumenti agiscono sopra quel suono in modo affatto diverso. Il riflettore ed il porta-voce lo renderanno percettibile a maggior distanza, ma in una sola direzione: la persona verso la quale fosse puntato il porta-voce o rivolto il riflettore percepirebbe un suono più intenso, mentre invece questa intensità sarebbe molto minore per una persona collocata lateralmente, e, dove la qualità del suono potesse essere accuratamente indagata, si troverebbe che perde sempre in purezza: e se il suono fosse articolato od in qualsiasi altro modo ben definito, assai probabilmente si verificherebbe che non lo si percepisce così distintamente come se fosse isolato.

Gli effetti prodotti sul suono primitivo dal contatto con un violino o con qualsiasi altro corpo risuonante sono molto diversi; in questo caso vi sarà una uniforme diffusione del suono nell'ambiente, e quantunque esso non pervenga a così grande distanza in una determinata direzione come nei casi del porta-voce e del riflettore, pure dove esso arriva è egualmente percettibile in tutte le direzioni, locchè mostra incidentalmente che la risonanza è specialmente atta a coadiuvare la diffusione naturale del suono, migliorandone anche la qualità.

Questo esperimento, che ognuno può ripetere senza grandi apparecchi, può servir a mostrare ben chiaramente che, mediante la risonanza di materiali elastici, sia soli, sia combinati con un corpo d'aria, noi abbiamo il mezzo di rinforzare, e nel tempo stesso di migliorare la qualità dei suoni emessi in tali circostanze da richiedere di essere sostenuti, e ciò è senza dubbio molto più di quanto può essere detto riguardo ad altre cause che agiscono per condotta o per riflessione.

Ora occupiamoci per un istante nel cercare quale sia l'influenza esercitata sui suoni da un corpo d'aria risuonante di determinata grandezza, indipendentemente dalle sostanze solide costituenti l'ambiente che lo contiene.

Se noi prendiamo per esempio la colonna d'aria contenuta in una canna da organo capace di dare una certa nota, e teniamo in prossimità alla canna due o tre diapason, dei quali uno solo possieda la nota relativa alla canna medesima, o la sua ottava od altra armonica, osserveremo che il suono di questo diapason diverrà sensibilmente più intenso a motivo delle vibrazioni simpatiche dell'aria nel tubo, mentre quello degli altri diapason rimane relativamente inalterato o quasi. Molti semplicissimi esperimenti potrebbero essere analogamente eseguiti con analoghi risultati, i quali porrebbero in evidenza un fatto già da noi accennato e che qui importa di porre in maggior luce, quello cioè del diverso modo di comportarsi di una massa d'aria, quando si trovi in condizioni da poter emettere una nota determinata e quello nel quale si contiene una tavoletta di legno elastico, ben stagionato, che, come già fu mostrato, vibra all'unissono con qualunque suono generato in prossimità ad essa.

Apparisce quindi che nell'influenza esercitata dai corpi risuonanti sui suoni noi abbiamo un mezzo di alterarne il tono e di aumentarne la intensità e che questo scopo si raggiungerà nel miglior modo mediante corpi i quali godano della proprietà di vibrare per simpatia con qualsivoglia nota. L'alterazione così prodotta nel tono è dovuta alla qualità della nuova sostanza che si fa vibrare, mentre l'aumento in volume ed in intensità risultano, il primo dalla massa fortemente aumentata del corpo vibrante e l'altro dalla sua energia vibratoria, essendo stato dimostrato in modo soddisfacente da Savart che queste vibrazioni indotte possedono talvolta una energia molto maggiore di quella che avrebbe prodotto la causa prima direttamente applicata al corpo risuonante.

Sarebbe ora desiderabile di vedere se questi principi possano riuscire applicabili in qualche modo a modificare le condizioni acustiche di un ambiente.

In tutti gli ambienti grandi e piccoli noi abbiamo necessariamente un corpo d'aria, e noi possiamo considerarli come una specie di gigantesca canna da organo, la cui nota può essere eccitata in alcuni casi da qualsiasi rumore di qualsivoglia specie, ed in altri da uno o più suoni i quali sieno in una certa relazione colla nota propria degli ambienti medesimi: se questa nota diventa percettibile, si

troverà d'ordinario che, una volta eccitata, continuerà anche dopo la cessazione del suono primitivo. Noi possiamo inoltre, se così ci piaccia, introdurre materiali che risuoneranno all'unissono con qualsiasi nota prodotta in vicinanza ad essi, cessando quando cessi la nota originale, e mutando con questa.

Consideriamo particolarmente ciascuno di questi agenti, cominciando dall'ultimo.

L'impiego di fodere in legno, raccomandato dalla teoria, è confortato dalla esperienza. Il Surrey Gardens Music Hall, il teatro della Regina, la sala di lettura della Royal Institution di Londra, quella del Conservatorio di Parigi, l'antico teatro di Parma, l'antico teatro dell'Argentina di Roma, edifizi che si contano fra quelli in migliori condizioni acustiche, sono, od erano, costruiti con grande quantità di materiale risuonante.

Soffitti, riflettori, fodere in legno delle muraglie, ecc., sono mezzi per introdurre vantaggiosamente materiali risuonanti. Un edifizio costruito su colonne col pavimento sostenuto da lunghe travi ed uno spazio vuoto al disotto oppure con uno spazio vuoto al disopra di un soffitto pure in legno, saranno verosimilmente molto più risuonanti che non se fossero pieni. Gli antichi conoscevano perfettamente il partito che può trarsi dall'uso del legno negli edifizi a questo scopo. Fino ad un epoca molto avanzata i teatri dei Romani erano costruiti completamente di legno e Vitruvio (1) adduce questa circostanza per ispiegare che i vasi di rame usati dai Greci, e sui quali avremo motivo di entrare in molti particolari più innanzi, non avevano bisogno di essere introdotti.

Intorno a questo argomento pertanto dissentono gli scrittori moderni, non ammettendo alcuni il vantaggio derivante dall'impiego di cosiffatto materiale, e molti fra essi (2) sostengono che il solo

(1) Libro v, cap. 5.

(2) Tra questi noterò il Taccani, il quale in un suo opuscolo *Sulla forma della platea e del proscenio di un teatro più propria alla propagazione del suono e sulla materia più atta a sostenerlo ed a rinforzarlo* (Milano, 1840) si pronunzia contro « l'opinione quasi universalmente trasfusa, cioè che le materie elastiche e specialmente il legno, sieno da preferirsi nelle costruzioni per ottenere degli ambienti sonori » (pag. 45, 62). Io non mi dilungherò a combattere gli argomenti portati dal Taccani contro un fatto che a me sembra fra i pochi accertati delle applicazioni dell'acustica. Del rimanente i principi stessi di acustica, sui quali egli appoggia in generale le sue argomentazioni, non sono essi medesimi inattaccabili, sostenendo egli fra le altre cose (pag. 33-39) la disuguaglianza degli angoli di incidenza e di riflessione.

aiuto che il suono può trovare nella forma e nella qualità dei materiali dell'edifizio consiste nel procurare riflessioni favorevoli alla propagazione del suono. È a sperarsi che quanto sinora venne esposto abbia mostrato che questo aiuto non è nè il solo, nè il più importante che è possibile di procurare; e nell'esame di alcuni edifizi già costruiti, dei quali ci occuperemo nella terza parte del presente lavoro, ci studieremo in particolare di illustrare questo punto controverso.

Notiamo anzitutto che, nel parlare di materiali risuonanti non si tenne parola che del legno, come se fosse il solo materiale opportuno allo scopo. Questo, a rigore di termini, non è il caso; ma la risonanza del legno si adatta talmente ai vari suoni in confronto di altre sostanze, ed è così poco atta a prolungare il suono, dopo che quello primitivo è cessato, che nessun materiale ci sembra comparabile con questo, o potrebbe sostituirlo, anche nel caso in cui esso si prestasse meno di qualche altro a scopi costruttivi.

Si presentano tuttavia dei casi, specialmente dove deve aversi speciale riguardo a porre la costruzione a riparo dai pericoli d'incendio, nei quali può desiderarsi di introdurre altro materiale risuonante, non trovando conveniente di servirsi del legno. Così, per modo di esempio, in Francia una disposizione di pubblica sicurezza ordina che la vôlta d'una sala ad uso di spettacoli sia costruita con materiali incombustibili.

Assai probabilmente la sola esperienza potrebbe suggerire il modo ed i mezzi di soddisfare a tale doppio desiderio. Se noi facciamo astrazione dal riflettore metallico che vedemmo impiegato con successo nella cattedrale di San Paolo di Londra, due soli esempi noi troviamo ricordati dell'impiego dei metalli per venire in aiuto alla risonanza. Il primo di questi esempi si riferisce ai tempi moderni e lo troviamo esposto dal Reid, il quale in una sua memoria (1), parla della introduzione e del largo uso da lui fatto di lastre di ferro nella Camera provvisoria dei Pari d'Inghilterra, lastre collocate da ambe le parti della Camera, immediatamente di facciata ai seggi occupati dai più notevoli oratori, e molto se ne loda; ma confessiamo che, per quanto attive ricerche noi abbiamo istituite per pro-

(1) *On the progress of architecture in relation, to ventilation, warming, lighting, fire-proofing, acoustics and the general preservation of health*, by D. B. Reid, nell'*Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution*, ecc., for the year 1856, pag. 183.

curarci informazioni particolareggiate e precise intorno a questa applicazione, nulla riuscimmo a trovare: abbandonata quella residenza provvisoria, non rimane infatti alcuna memoria delle particolarità della sua costruzione. Il secondo esempio ci è offerto dagli antichi Greci, i quali, costruendo i loro teatri di pietra o di marmo, si studiarono di rinforzare i suoni prodotti in quegli ambienti mediante la risonanza di piccoli volumi d'aria contenuti in vasi o giare di rame, in luogo dei quali però troviamo talvolta sostituiti dei vasi di terra cotta, l'agente rinforzante per verità non essendo, a rigore di termini, in questo caso il materiale del vaso, ma la massa di aria in esso contenuta (1). Questo espediente verrà in discussione quando noi passeremo in accurata rassegna i teatri degli antichi; ma non sarà fuori di luogo il richiamare fin d'ora l'attenzione sul fatto che anche presso di noi esiste un esempio famigliare di uno strumento musicale, nel quale, forse senza rendercene conto, noi otteniamo su larga scala i vantaggi realizzati dai Greci coi loro vasi.

Nei diversi registri di un organo noi abbiamo una serie di note tonate (ci si passi il termine) o all'unissono, o per ottave, o per armoniche l'una dell'altra, in modo che, quando una singola nota è emessa sopra un singolo registro vi sono almeno altrettante canne silenziose capaci di dare la stessa nota, quanti sono i registri dello strumento ed il quadruplo od il quintuplo che si trovano con esse in relazione armonica: non v'ha dubbio che questa risonanza deve essere eccitata in alcune e forse in tutte queste canne da quella nota, e che, al mescolarsi della risonanza delle canne silenziose colla nota emessa da quelle nelle quali è direttamente eccitato il suono, devesi la bellezza e la solennità del tono offerto dall'organo, specialmente per il tono dei singoli registri suonati isolatamente. Ne segue che la presenza d'un organo in un'orchestra, od in una sala, od in una chiesa, anche se lo strumento non venga suonato, non sarà probabilmente senza utilità per il tono degli altri strumenti e per il timbro della voce umana.

È difficile il dire se la presenza di materiali risonanti spinta all'eccesso possa produrre per sè stessa eccesso di risonanza, ma può forse produrre tale effetto qualora la si consideri cumulativamente colla

---

(1) Qui naturalmente non teniamo parola del famoso soffitto metallico del nuovo teatro dell'Opera di Parigi, poichè in tal caso l'impiego del metallo non venne suggerito da considerazioni inerenti ad esigenze acustiche.

risonanza dell'atmosfera. In ogni caso sarebbe questo un difetto al quale può rimediarsi coll'uso di stoffe, panneggiamenti, ecc. Noi abbiamo già avuto occasione di accennare ad esempi, nei quali, in certe circostanze nelle quali gli ambienti trovavansi in buone condizioni acustiche, l'aggiunta di mezzi assorbenti il suono le avevano alterate per modo da rendere pressochè impossibile ad un oratore di far udire dagli astanti la propria voce; ma non mancano altri esempi, nei quali, l'ambiente essendo per sua natura eccessivamente sonoro, l'introduzione di mezzi assorbenti ne migliorò in misura notevole le condizioni acustiche.

Così, per modo di esempio, racconta il Saeltzer (1) che nella chiesa di San Paolo, a Boston, il predicatore non è inteso bene che un giorno solo dell'anno, a Natale, a motivo dei panneggiamenti dei quali in questa occasione vengono decorate le pareti. Inoltre nell'aula della Camera italiana dei Deputati a Montecitorio si è osservato che quando, in occasione della morte del Gran Re, la sala rimase per qualche tempo parata a lutto, le condizioni acustiche, ordinariamente tristi, avevano subito un certo miglioramento. Deve tuttavia ricordarsi che un uditorio, colla sua presenza nell'ambiente, ne diminuisce, e di molto, la sonorità, per modo che ambienti di giusta sonorità, quando occupati dal pubblico, possono essere giudicati rumorosi quando si trovino vuoti ■ semi-vuoti. A tale proposito ecco quanto racconta il Tyndall (2): ■ Il 16 maggio 1865, dovendo io tenere una lettura nella sala del Senato dell'Università di Cambridge, feci prima alcune prove sulla intensità che doveva dare alla mia voce pe. riempiere tutta la sala, e fui sconcertato nel rilevare che un amico, collocato a qualche distanza da me, non poteva intendermi distintamente, a motivo della risonanza e degli echi. E tuttavia, allorchè il mio uditorio fu raccolto e la sala ne fu ripiena, le onde sonore erano abbastanza smorzate perchè non vi fosse neppur l'ombra di un eco, ■ la mia voce fu perfettamente intesa da tutti i punti della sala ».

---

(1) *A Treatise on Acoustics in connection with ventilation*, ecc., by ALEXANDER SAELTZER. New York, 1873, pag. 59.

(2) *Sound*, ecc., by J. TYNDALL. London, 1868, pag. 20.

§ V.

Proporzioni di un ambiente più opportune per soddisfare alle esigenze di una buona audizione.

Venendo ora a trattare della risonanza del corpo d'aria contenuto in un ambiente, dobbiamo anzitutto avvertire essere questo un argomento che non venne peranco studiato in modo conveniente ed all'altezza della sua effettiva importanza.

Come in una colonna d'aria contenuta in una canna da organo, così nell'aria contenuta in un ambiente qualunque, il volume, le dimensioni, la forma, le divisioni delle quali è suscettibile sono elementi di cui è funzione la eventuale sonorità, e quindi dovranno essi venire attentamente studiati per giudicare dei danni e dei benefizi che potranno derivare dalla massa d'aria contenuta in un ambiente, considerata come capace di modificare suoni, e per somministrare elementi teorici e pratici relativi alla natura delle ondulazioni e delle vibrazioni che possono essere eccitate in una grande massa d'aria ed alla influenza che su di essa può venire esercitata dalle proporzioni, dalla forma e dalle dimensioni dell'ambiente. Ben poco fu fatto finora in questo indirizzo, e per parte nostra ci contenteremo d'aver posta qui la questione, riservandoci di studiarla più innanzi, dopo che avremo raccolto i dati relativi ad alcuni ambienti, le cui condizioni acustiche furono bene accertate.

L'esame del violino ha posto in evidenza che un corpo d'aria racchiuso entro pareti mantiene la nota musicale sua propria con maggiore persistenza che non facciano le sottili tavole di legno entro le quali trovasi racchiusa, e che, quando allo strumento si faccia dare la nota sua propria, questa è quella propria della massa d'aria e non delle tavole di legno, ed inoltre che, sotto l'influenza delle vibrazioni delle corde, questa massa d'aria coadiuva le tavole di legno nel rinforzare tutti i suoni prodotti dall'esecutore, e che infine ciò avviene tanto più perfettamente quando la sua nota è in perfetta armonia colla nota fondamentale delle corde. Ora un ambiente si trova nelle medesime condizioni: qualsiasi materiale risuonante, il quale possa venire impiegato, adempie alle medesime funzioni come le pareti dello strumento, e la massa d'aria in esso compresa sostiene

quindi il suono emesso nello stesso modo come quella contenuta nel corpo del violino.

L'esistenza d'una nota propria ad un ambiente fu da lungo tempo riconosciuta (1): la sola differenza che esiste fra la nota di un ambiente e quella, per esempio, di una canna da organo, consiste in ciò che nella maggior parte dei casi la nota che attualmente si ode è soltanto un'armonica od una mescolanza di armoniche della nota reale. Senza dubbio tornerebbe di grande vantaggio aver mezzo di accertarsi che questa nota avrà un grado di acutezza ben definito che si sappia tornerà vantaggioso, ma, in mancanza di ciò, tenendo ferma l'analogia col violino, riuscirà utile che questa nota sia ben netta, e, se è possibile, non tornerà inutile mostrare, senza troppo grande sforzo di immaginazione, che le buone proporzioni di un ambiente gioveranno alla purezza della nota sua propria per modo che venga a gettarsi una qualche luce su di un fatto, più ammesso nella pratica che in accordo colla teoria, vale a dire che le medesime proporzioni che appagano l'occhio sono pienamente soddisfacenti per i risultati ai quali conducono sotto il punto di vista acustico.

Se in una stanza vuota non troppo piccola noi produciamo un qualche strepito improvviso, quale per esempio si ottiene battendo del piede sul pavimento, sarà d'ordinario possibile, allo smorzarsi del suono, distinguere il presentarsi d'una nota musicale — quella appunto della quale stiamo occupandoci. Ciò è assai probabilmente cagionato dall'eco che va ripercuotendosi da parete a parete, e dal pavimento al soffitto. Supponiamo ora che le dimensioni dell'ambiente abbiano fra loro un qualche rapporto semplice, come p. e. 1 di altezza, 2 di larghezza e 4 di lunghezza, ne seguirà che le ripetizioni cagionate da questi echi colpiranno l'orecchio di qualsiasi uditore che si trovi in qualunque parte della stanza, ad intervalli successivi uguali. Per esempio, in una sala alta 8 metri, larga 16 e

---

(1) A questo proposito il DOLBEAR, già citato, scrive: « In quasi tutte le stanze non più lunghe di 15 o 20 piedi (4 m. 1/2 = 6), una persona può trovare certi tòni di voce a cui sembrino rispondere le pareti. Alcune brevi gallerie di strada ferrata possiedono in certe posizioni dei tòni potenti, responsivi, risonanti. È certamente una di queste quella del *Central Park* di Nuova York. È lunga da 40 a 50 piedi (da 12 a 15 m.). Ad una persona che stia in mezzo di questa galleria, e che parli, o che faccia qualsiasi specie di rumore a un certo grado di altezza tonica, la risonanza è quasi assordante ». (*Il Telefono*, ecc. Firenze, 1878, pag. 39).

lunga 32, l'eco in ogni direzione seguirebbe una via che dal soffitto al pavimento e viceversa sarebbe di 16 metri e per conseguenza potrebbe essere percorsa circa 10 volte in un secondo, quella da un estremo all'altro di 64 metri e potrebbe essere attraversata circa 5 volte in un secondo. Altri echi sarebbero percettibili, variando colla relativa posizione dell'uditore o del centro fonico, ma la equabile ricorrenza di quelli testè avvertiti sarebbe quella che ecciterebbe agitazioni sonore nell'aria. Ora, partendo dalla nota proprietà delle onde e delle colonne d'aria sonore di dividersi in parti uguali, possiamo assumere come probabile che le onde così prodotte si suddividano per via di nodi in altre ondulazioni più corte ed un breve esame della natura della nostra sala fittizia mostrerebbe che tale suddivisione farebbe coincidere più frequentemente le tre specie di movimenti supposti. Per esempio, la divisione in due della ondulazione longitudinale la farebbe coincidere coll'onda trasversale; la sua divisione in quattro coll'onda verticale o colla suddivisione in due della orizzontale e così via. E poichè suoni composti di cinque, dieci, ed anche venti ripetizioni in un secondo non riescono d'ordinario percettibili, è certo che la nota dell'ambiente (quando la ipotesi qui avanzata fosse giusta), sarebbe più alta che non quella dovuta alla supposta ondulazione verticale; ma, attesa la mancanza quasi assoluta dei relativi dati sperimentali, dobbiamo limitarci a dire che vi sarebbe motivo per ritenere che questa nota sarebbe un'armonica di quella dovuta a 20 vibrazioni per secondo, vale a dire avrebbe 40, 60, 80 od altro consimile numero più elevato di vibrazioni, prodotta dal suddividersi della colonna d'aria mediante un certo numero di punti nodali, e che inoltre essa riuscirebbe ben distinta.

Supponendo pertanto dimensioni tali per cui le riflessioni vengano a colpire l'orecchio ad intervalli irregolari, vale a dire che le pulsazioni passando e ripassando da parte a parte coincidano assai raramente con quelle da estremo ad estremo o dal pavimento al soffitto, il risultato ne sarà che, dal momento in cui il suono proprio dell'ambiente ed eccitato in esso dagli echi di un altro suono comincia ad apparire, riuscirà percettibile un rumore e non già una nota.

Parecchi autori (1) si occuparono di questo importante argomento,

---

(1) Veggansi in particolare una memoria di Scott Russell nei *Building News* del mese di dicembre 1858, ed una seconda di Fletcher Barrett nel *Builder* del 22 maggio 1869.

però sempre sotto le più ampie riserve, attesa la mancanza di precisi dati sperimentali. Gioverà tuttavia ricordare qui che Savart (1) pose già fuori di dubbio la esistenza di linee di massima agitazione nell'aria e che Herschel (2) ebbe a constatare il fatto nei termini seguenti, chè a motivo della importanza e delicatezza dell'argomento vogliamo riprodurre testualmente affinchè nulla perdano della loro originale precisione: « If we carry an exploring membrane about the apartment, noting all the points where it vibrates most forcibly, allowing ourselves, as it were to be led from spot to spot by its indications, we shall trace out in the air of the room a curve of double curvature, marking the maxima of the excursions of the aerial molecules. If the experiment be made in a gallery or passage, whose length is its principal dimension, this curve will be found to be a kind of spiral, creeping round the walls, floor, and ceiling obliquely to the axis of the gallery, thus presenting a marked analogy to the disposition of the nodal lines in a long rod vibrating tangentially, which are also, it should be remarked, imitated with modifications more or less complicated, in square or rectangular rods. » Un effetto ancor più rimarchevole fu osservato da Savart nell'esaminare per tal modo le vibrazioni dell'aria in un appartamento con una finestra aperta (3). Egli trovò infatti che la disposizione spirale delle parti vibranti continuava anche fuori della finestra all'aria aperta.

Forse, per chi potesse disporre dei mezzi necessari onde eseguire questi o consimili esperimenti in un ambiente nel quale si producessero dei suoni, non riuscirebbe difficile ottenere alcuni risultati sperimentali, i quali servissero a fornire elementi per formarsi un giusto concetto della questione; ma poichè questi non si hanno, nè, per quanto è a nostra cognizione, richiamando attualmente un siffatto problema la attenzione dei fisici, lo ripetiamo, il miglior partito al quale appigliarsi ci sembra ancora quello di raccogliere con cura e pazienza la maggior copia possibile di dati intorno alle principali dimensioni di edifizi già costruiti e di condizioni acustiche bene accer-

---

(1) *Recherches sur les vibrations de l'air*, par M. FÉLIX SAVART, negli *Annales de Chimie et Physique*. Tome vingt-quatrième. Paris, 1823, pag. 56-88.

(2) Veggasi l'articolo « *Sound* » nella *Encyclopaedia Metropolitana*. Vol. 28, pag. 813.

(3) Intorno alle applicazioni pratiche delle ricerche di SAVART nei rispetti architettonici veggasi il trattato di GAVARRET, *Sur la phonation et l'audition*, pagina 217.

tate; meglio ancora se taluno penserà a far costruire una specie di ambiente sperimentale, le cui pareti possano essere ravvicinate ed allontanate in modo da poter studiare colla maggior larghezza le modificazioni che subiscono le onde sonore nella loro propagazione.

In tutti i casi pertanto nei quali la distinta percezione dei suoni, anche meno intensi, è lo scopo principale al quale si mira, e dove l'effetto musicale è di secondaria importanza, può senza tema d'errore osservarsi, essere opportuno di ridurre per quanto è possibile il volume d'aria contenuto nell'ambiente fintantochè ciò sia compatibile colle buone proporzioni di esso, e coll'avvertenza che converrà avere di lasciare libero spazio al suono di penetrare dovunque si vuole che esso giunga. Se poi si tratti di edifizi adatti alla naturale propagazione del suono, come avviene per es. nei teatri, e l'uditorio sia distribuito in lunghe ed alte gallerie, sarà assai opportuno che sieno elevate, ma di area tanto più ristretta quanto sarà possibile — che se invece si tratti di sale per pubbliche letture, queste in proporzione dovranno essere basse, particolarmente se appartengono alla ordinaria categoria, nella quale si conta principalmente sulla condotta e riflessione del suono e dove l'uditorio occupa la platea e tutto al più una galleria. Insomma o da una parte o dall'altra, o nell'altezza o nell'area converrà studiar modo di ridurre il cubo d'aria quanto sarà possibile.

Prima di passare all'ultima parte del nostro lavoro, nella quale ci proponiamo di studiare la applicazione dei principi di acustica teorica e teorico-pratica alla pratica attuale, ci sia lecito di richiamare per un istante l'attenzione del lettore sopra lo scopo delle osservazioni fatte in uno dei primi paragrafi di questa seconda parte.

Lo studio dei mezzi, coi quali venire in aiuto alla propagazione del suono ci ha trattenuti relativamente a lungo: è infatti naturale il desiderio di rendersi perfetta ragione di tutto quanto può essere fatto secondo questo indirizzo, e per noi è fuori di dubbio che, per risolvere completamente il gravissimo problema dell'acustica in un edifizio di grandi proporzioni, non basta l'aver evitato tutti gli ostacoli, ma altresì è necessario mettere in campo tutti i mezzi i quali concorrono ad esercitare una proficua influenza sulle sue condizioni acustiche. I quali mezzi, ci affrettiamo tosto ad aggiungere, ed in particolare taluni di essi, non vengono pressochè mai apprezzati al loro giusto valore, poichè gli effetti ne sono assai meno sensibili di quello che riescano gli inconvenienti derivanti dai più gravi difetti.

Del resto noi lo ripetiamo ed insistiamo su questo punto che giu-

dichiamo di essenziale importanza: tutti gli sforzi dell'architetto devono essere anzitutto rivolti a togliere di mezzo gli ostacoli che si oppongono alla propagazione ed alla uniforme diffusione del suono. Raggiunto questo scopo si sarà già percorso un buon tratto di cammino sulla via del successo, ed una volta prese tali precauzioni, allora, ma soltanto allora, dovrà ricorrersi all'impiego dei mezzi che sono a disposizione del tecnico per rinforzare e sostenere il suono, non trascurando neppur quelli che potrebbero a prima giunta sembrare di troppo lieve vantaggio o troppo (ci si passi il termine) delicati per riuscire di pratica utilità in confronto di altri più ovvii e di vantaggio più evidente, poichè gli è soltanto da una saggia combinazione di vari mezzi, ognuno dei quali contribuisca per la parte sua, che il successo potrà dirsi assicurato.

Non deve poi in pari tempo dimenticarsi che anche l'impiego di questi mezzi coi quali può venirsi in aiuto al suono deve esser fatto con sano criterio ed in giuste proporzioni, e nè essere spinti all'eccesso, nè essere impiegati esclusivamente, poichè una soverchia riflessione può degenerare in eco, una eccessiva risonanza in rumore.

Nessun difetto si stimi tanto lieve da non valer la pena di occuparsene, nessun vantaggio così piccolo da non meritare di approfittarne.

Con questi criteri generali i quali guidino nella applicazione dei principi teorico-pratici dell'acustica noi nutriamo ferma fiducia che il gravissimo problema possa essere condotto a felice soluzione.

PARTE TERZA

APPLICAZIONI

§ I.

Classificazione degli edifizi sotto il punto di vista delle condizioni acustiche.

Nel provarci a segnalare l'applicazione pratica che dei principi teorici e teorico-pratici fin qui dedotti può farsi, il metodo più opportuno ci sembra quello di — combinare in gruppi quegli edifizi o quelle classi di edifizi, che, nei rapporti dell'acustica devono soddisfare alle medesime esigenze e che devono ripetere il successo della applicazione dei medesimi principi — indi chiarire le proprietà offerte dalle varie classi di edifizi appartenenti a questi gruppi, aggiungendo qualche descrizione illustrativa di alcuni celebri esempi e studiandoci di mostrare sotto quali punti di vista i risultati da loro forniti possano considerarsi come applicazione dei principi teorici già esposti.

Anzitutto deve fissarsi bene che altro è esaminare le caratteristiche e le qualità d'un edifizio già costruito e vedere in qual modo esso possa soddisfare alle esigenze dell'acustica, avuto riguardo allo scopo per il quale venne costruito, ed altra cosa e ben diversa ed assai più difficile è quella di applicare con sicurezza e successo queste leggi generali alle disposizioni da darsi ad un edifizio da costruirsi, affinchè esso soddisfi nel miglior modo desiderabile alle esigenze della acustica.

Noi crediamo ad ogni modo che la via migliore onde raggiungere lo scopo ed acquistare un giusto criterio del valore delle massime teoriche consista nel sottoporle alla prova della pratica attuale.

La varietà che si osserva nella disposizione di tutte le parti essen-

ziali degli edifizi destinati a radunanze numerose dipende dal fatto che ben di rado, e può dirsi quasi mai, le disposizioni di un edifizio si subordinano e si vincolano nella forma, nelle proporzioni e nei materiali esclusivamente alle esigenze delle leggi di acustica. D'ordinario una quantità di altre circostanze esercitano una influenza decisiva e le considerazioni di tutto quanto può agevolare la uniforme diffusione del suono e la sua distinta e perfetta audizione devono tutto al più combinarsi colle esigenze imposte da altre parti dello stabilito programma.

In questa terza parte del nostro lavoro noi ci proponiamo pertanto di incominciare i nostri studi e le nostre indagini da quegli edifizi nei quali la voce, od i suoni si diffondono o totalmente o principalmente per diretta radiazione naturale — ed in questa categoria comprenderemo i teatri antichi, quelli moderni, le aule parlamentari, le sale per pubbliche letture e le corti d'assise.

Noi passeremo in appresso allo studio di edifizi, nei quali il suono viene diretto, contenuto o condotto, e comincieremo dalle antiche basiliche, occupandoci successivamente delle moderne chiese ed altri luoghi destinati al culto, sale, ed in genere grandi e piccoli ambienti. Aggiungeremo infine talune osservazioni intorno ad alcuni edifizi che non trovano posto in alcuna delle due accennate categorie.

Taluni autori credettero opportuno di adottare una distribuzione diversa dividendo gli edifizi a seconda delle loro proporzioni in due categorie, in quelli cioè che non eccedono ed in quelli che oltrepassano le dimensioni le quali limitano la naturale radiazione del suono. Tale divisione pertanto non pone la questione sotto la sua vera luce e la classificazione che ne deriva non sempre collima con quella che apparisce meglio conforme alla destinazione degli edifizi.

Se invece, senza riguardo alle dimensioni, noi dividiamo gli edifizi in quelli nei quali la forma è retta dalla naturale radiazione del suono e quelli nei quali è per contrario regolata in base alle influenze esercitate dalle pareti e dal soffitto, noi abbiamo due gruppi che senza difficoltà possiamo distinguere in ambienti a radiazione naturale ed in ambienti a radiazione artificiale, le cui principali, ma non assolute ed esclusive caratteristiche, sono le seguenti:

Negli edifizi, nei quali il suono viene direttamente irradiato dall'oratore agli uditori, la forma si avvicina sensibilmente alla circolare ed alla semicircolare, gli estremi limiti dell'edifizio essendo per gran parte all'incirca ad una distanza uguale dall'oratore od in generale dal centro fonico: e, nel caso in cui l'area sia limitata, i seggi trovandosi

disposti ad anfiteatro od a gallerie — tali edifizi, senza inconvenienti, possono in generale essere anche assai elevati, e parecchie volte lo sono.

Negli edifizi nei quali il suono viene diretto o condotto lungo le muraglie od i soffitti e mediante essi ne è impedita la dispersione laterale e viene inoltre coadiuvato dalla riflessione, la forma deve combinarsi d'accordo coll'impulso iniziale del suono onde condurlo in una determinata direzione. Questi edifizi hanno la maggiore dimensione nel senso della lunghezza, non dovrebbero in genere essere di molto elevati, sono comunemente a pianta rettangolare e l'uditorio vi è distribuito sopra un piano.

Si troverà quindi che d'ordinario l'uno o l'altro di questi criteri direttivi, a seconda delle proporzioni testè prese in esame, dovrebbe prevalere, meno quei casi, del resto non molto numerosi, nei quali un dato edifizio partecipa delle proprietà di ambedue i gruppi. Inoltre dovrà giudicarsi che l'aiuto il quale può trarsi dall'impiego di materiali risuonanti e da quello di riflettori collocati al di dietro o al di sopra od anche, come avremo motivo di vedere, al di sotto degli oratori od in generale del centro fonico, torneranno, generalmente parlando, di utilità, così negli edifizi d'un gruppo, come in quelli dell'altro. Ne segue che le considerazioni inerenti alla possibilità di applicare questi due modi di venire in aiuto alla diffusione del suono dovrebbero entrare nei calcoli dell'architetto in ogni occasione: tenendo però bene a mente che altra cosa è disporre delle sale in modo favorevole alla propagazione del suono ed altra e ben più difficile l'ottenere dei rinforzi convenienti con mezzi artificiali.

Finalmente, come già si è accennato, il limite di grandezza (seppure questo limite esiste) non può essere agevolmente fissato in modo da decidere in via assoluta a quale dei due principi converrà di ricorrere; poichè, quantunque il principio della condotta (o di artificiale disposizione) sembri promettere un mezzo per rendere il suono percettibile ad un più numeroso uditorio, tuttavia si opina da persone competentissime potersi da tale forma prescindere ed essere praticamente possibile la erezione di un edifizio di forma consimile a quella di un teatro e che per conseguenza dipende in principal modo dalla naturale radiazione del suono, dentro il quale possa accogliersi in ottime condizioni acustiche un uditorio doppio di quello che potrebbe a parità di condizioni essere contenuto in un ambiente qualunque di forma oblunga e costruito in modo da favorire la condotta del suono e da impedirne la dispersione laterale.

CAPITOLO I.

EDIFIZI NEI QUALI LA VOCE ED I SUONI SI DIFFONDONO TOTALMENTE O PRECIPUAMENTE PER EFFETTO DI NATURALE RADIAZIONE.

§ I.

Teatri antichi dei greci e dei romani.

Se noi ci facciamo ad indagare in quali condizioni un oratore può rivolgere il discorso ad un numeroso uditorio, affinchè il suono della sua voce riesca percettibile ad ognuno degli uditori e rimanga nel tempo stesso scevro da eco o da interferenze, noi dovremmo conchiudere che la pianta dell'ambiente dovrebbe foggiarsi sul diagramma del Saunders (fig. 2), del quale abbiamo già tenuto parola: diagramma dal quale risulterebbe che l'oratore dovrebbe occupare una posizione quasi centrale (1). Quanto venne inoltre esposto relativamente agli ostacoli che si oppongono alla diffusione del suono, condurrebbe a disporre i seggi degli uditori a forma di gradinata.

---

(1) Vogliamo qui avvertire che il Fergusson (*History of the modern styles of Architecture*, London, 1862, pag. 450), nelle sue considerazioni intorno alla costruzione dei teatri parte da un'altra ipotesi sulla propagazione della voce. Egli ammette infatti che « in una atmosfera perfettamente tranquilla e dove la propagazione del suono sia pienamente libera, l'onda sonora assume sempre la forma della fig. 15, nella quale in A si suppone il centro fonico ». Che torni opportuno partire da questa ipotesi nelle considerazioni relative alla forma da darsi ad un teatro, vogliamo anche ammettere; ma che tale sia il fatto comprovato dall'esperienza dobbiamo recisamente negare.

Fig. 15.

Una convenienza di disposizione e la necessità di soddisfare alle esigenze ottiche suggerirebbe una distribuzione concentrica delle varie file di sedili e finalmente la opportunità di riservare un determinato spazio per l'ingresso e l'uscita dell'oratore o per la esposizione di oggetti che dovessero essere mostrati all'uditorio indurrebbe a lasciare vuoto uno spazio al di dietro dell'oratore, dove d'altronde l'uditorio non sarebbe al caso di vedere la faccia ed i gesti di chi parla, quantunque ne potesse fino ad una certa distanza intendere la voce.

Queste esigenze non furono mai così perfettamente e semplicemente soddisfatte come nei teatri antichi, e noi infatti consideriamo un teatro degli antichi greci come il tipo più perfetto di quella categoria di edifizi in forma di anfiteatro, nei quali gli astanti odono per effetto della naturale radiazione del suono.

Circa la forma e la costruzione dei teatri, solevano i Greci approffittare delle condizioni naturali del terreno e sceglievano quindi volentieri anche per il teatro naturali alture e pendenze: e qui forse è da trovare la ragione per la quale Vitruvio (1) consiglia di dare per la località nella quale erigere un teatro la preferenza a luoghi montuosi.

Era il teatro (2) una fabbrica di forma semicircolare, terminata da una parte da un mezzo cerchio, dall'altra da un diametro o quasi diametro.

L'anfiteatro poi era di forma circolare od ellittica, quanto a dire comprendeva due teatri uniti insieme (3); ma di questo, come di

---

(1) Lib. V, cap. III.

(2) Intorno alla forma degli antichi teatri, veggansi le fonti seguenti, che citiamo sommariamente: Onuphr. Panvinii, *De Ludibus Circensibus.* — Jul. Caes. Bulenq., *De Circo Romano Ludisque Circensibus.* — *Thesaur. Antiq. Roman.* T. IX. — Lili Gregorii Giraldi, *De Comoedia ejusque apparatu omni et partibus.* — Julii Caesaris Scaligeri, *De Comoedia et Tragoedia.* — Jo. Baptistae Casalii, *De Tragoedia.* — *Thesaur. Antiq. Graec.* T. VII. — Emmanuelis Martin, *De Theatro Saguntino.* — Jos. Emmanuelis Miniana, *De Theatro Saguntino.* — Maffei, *Degli Anfiteatri, ed in particolare di quello di Verona.* — Maffei, *Degli Anfiteatri di Francia.* — Maffei, *Degli antichi Teatri di Francia.* — Gio. Montenari, *Discorso del Teatro Olimpico di Andrea Palladio.* — Boindin, *Discours sur la forme et la construction des Théatres anciens.* — Piranesi, *Teatro d'Ercolano.* — Bocchi, *Osservazioni sopra un antico Teatro scoperto in Adria.* — Koningham nei *Transactions of the Irish Academy for the year* 1789 — Stratico, *Dell'antico Teatro di Padova.*

(3) Cade qui in acconcio di ricordare il teatro fatto costruire da Caio Curione a proposito del quale scrive Plinio (*Historiarum mundi*, lib. XXXVI,

edifizio nel quale interessava soltanto di vedere, noi qui non ci occuperemo.

Il teatro propriamente detto aveva nel mezzo una piazza detta orchestra (ὀρχηστρα dal verbo ὀρχησαι, *saltare*, per essere la località destinata dai greci alle danze), che corrisponderebbe alla odierna platea, dove erano sedili distinti. Attorno attorno pel semicerchio andavano di mano in mano alzandosi delle gradinate (*gradationes* dei romani, διαζώματα dei greci) ad uso del popolo spettatore. Il diametro, o quasi diametro, formava tutta la scena: il pulpito su cui gesticolavano o parlavano gli attori era propriamente detto *proscenium* (προσκήνιον dei greci), dietro al quale stava la fronte di un magnifico edifizio, che era propriamente la scena (σκηνή dei greci).

Vitruvio insegna ad ottenere la posizione più opportuna della scena e del proscenio nel teatro romano coi precetti seguenti: « determinato che sia il giro del fondo si fa centro nel mezzo O (fig. 16) e si descrive attorno un cerchio: in esso si hanno da inscrivere quattro triangoli equilateri ed equidistanti, gli angoli dei quali tronchino la circonferenza del cerchio segnato.... di questi triangoli quel lato CD, il quale sarà più vicino alla scena, determinerà la fronte della medesima in quella parte ove taglia la circonferenza del cerchio. Indi per

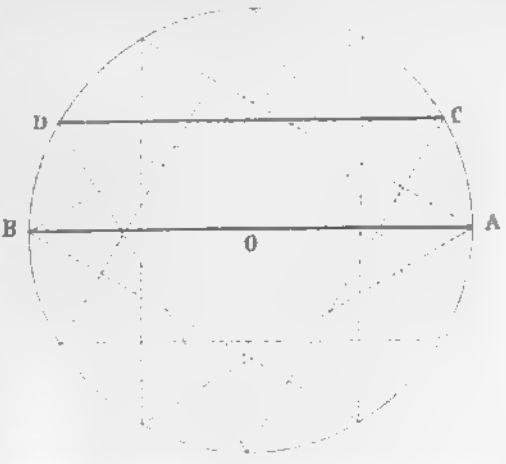


Fig. 16.

cap. XXIV). « Egli fece due teatri grandissimi in legno, l'uno appresso all'altro i quali erano sospesi e bilicati da potersi volgere in ogni parte, nei quali, essendo l'uno vôlto all'altro, mandato fuori lo spettacolo dei giuochi, acciocché le scene non facessero rumore, furono di nuovo subito rivolti, in modo che stavano l'uno di contro all'altro, e alla fine del giorno, separandosi le tavole, congiungendosi le estremità insieme, faceva anfiteatro e dava spettacoli di gladiatori e portava attorno il popolo romano ». Veggansi alcune curiose ed interessanti ricerche istituite dal prof. SIGISMONDO GÜNTHER intorno al modo possibile di effettiva costruzione di questo teatro nell'*Archiv für Mathematik und Physik* di GRUNERT, LV Theil, Greifswald, 1873, pag. 147-163.

il centro O si conduca una retta parallela AB alla medesima: questa separerà il pulpito del proscenio dal luogo dell'orchestra ». Quanto al posto da assegnarsi al pubblico viene prescritto quanto segue: « Le divisioni dei cunei per gli spettatori saranno regolate dagli angoli dei triangoli, sicchè le linee guidate da questi al centro dirigano le scalette di comunicazione fino alla prima precinzione, e sopra poi, le scalette poste alternativamente, formino i cunei superiori sul mezzo degl'inferiori ». Per cunei s'intendono quegli spazi nella scalinata, a forma di settori tronchi, che sono compresi tra due precinzioni da due archi e da due porzioni di raggi de' cerchi nei quali è disposta la scalinata.

Per il teatro greco, descritto il cerchio che rappresenti il giro del fondo, o di pianta dell'orchestra, prescrive Vitruvio (fig. 17) che « si inscrivano in esso tre quadrati, sicchè nuovamente la circonferenza resti divisa in dodici parti uguali. La tangente al cerchio parallela ad un lato di uno dei quadrati sarà il termine del pulpito o *logio*. Il giro dei gradi da sedere non si compirà col semicerchio, ma dovrà continuare da amendue le parti per due archi fino al termine del pulpito. Questi due archi si descriveranno facendo centri gli estremi punti del semicerchio, e prendendo per raggio il diametro del circolo di pianta dell'orchestra ». Quindi l'orchestra del teatro greco risulta più ampia che nel romano, ed il pulpito più ristretto, il che corrisponde appunto agli usi vari delle due nazioni; perchè tra i Greci i soli attori comici e tragici operavano sul pulpito o proscenio o palco, gli altri attori detti timelici, cioè, danzatori e mimi, operavano nell'orchestra.

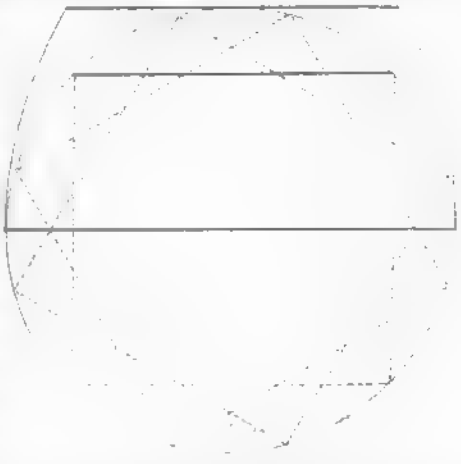


Fig. 17.

Quanto alla scena greca essa non si limitava nella parte decorativa alla sola fronte, anticamente ad un solo piano e poi costituita da un insieme architettonico, riccamente ornato di colonne, architrave e cornici; ma già fin d'allora erano in uso due od anche tre quinte

laterali dette *περίακτοι* oppure *μηχαναί* (1). Un *περίακτος* era una ossatura di legno, leggera, rivestita di tela dipinta, avente la forma di un prisma a base triangolare (fig. 18) e tale da poter esser fatta facilmente girare intorno al proprio asse; per tal modo cambiando la scena anche le periacte potevano rivolgere una nuova faccia agli spettatori. Ciascuna delle tre faccie portava dipinta una decorazione diversa, e col cambiare la posizione delle periacte si indicava un cambiamento di luogo, o di tutta la scena, o di una parte di essa; durante l'azione si aveva per tal modo la scena chiusa lateralmente.

Fig. 18.

Il Rhode nel pregevole suo opuscolo più volte citato, esprime pertanto l'avviso che le periacte degli antichi potrebbero essere utilmente sostituite alle quinte moderne con notevoli vantaggi sotto il punto di vista acustico. Egli entra anche in alcuni particolari relativamente al modo nel quale potrebbero disporsi senza che ne derivi danno alla illuminazione della scena. Per gli ulteriori particolari noi ci limitiamo a rimandare alla fonte citata (2), osservando soltanto che, qualora realmente i decoratori dei moderni teatri potessero indursi a ritornare all'uso delle antiche periacte, verrebbe a diminuirsi di molto la quantità di suono che oggidì, attraverso le quinte, inutilmente si disperde. Consimile opinione esternò pure il Damun (3).

Quanto alla distribuzione delle gradinate, essa era regolata in modo,

---

(1) Vitruvio, Lib. V, cap. III. — Lohne, *Die Skene der Alten*. Berlin, 1860. — Guhl und Koner. *Das Leben der Griechen und Römer*. Berlin, 1860, pag. 430.

(2) *Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler*. Berlin, 1880, pag. 77-78.

(3) *Nouveau Théâtre tracé sur les principes des Grecs et des Romains*. Paris, 1744, pag. 16.

come prescrive Vitruvio, « che tirata una linea dal primo gradino all'ultimo, questa tocchi tutte le cime, o sieno angoli dei gradini, e così non si impedirà la voce ». Così almeno si credeva, ma la regola non dev'essere stata fortunatamente seguita; ed infatti, fra gli altri, l'anfiteatro di Nismes, che risale all'epoca romana, ci porge l'esempio di gradinate esposte secondo le norme più opportune che a suo luogo abbiamo diffusamente sviluppate.

E più innanzi, ai riguardi acustici, porge Vitruvio il precetto seguente, che ci permettiamo di qui riportare per esteso, valendoci della traduzione del Galiani (1): « Si deve badare ancora che il luogo non sia ottuso, ma anzi tale che vi si spanda con chiarezza la voce: e questo si avrà scegliendo un luogo ove non sia impedito il rimbombo. La voce è un vento che scorre e che si rende sensibile all'udito colla percossa dell'aria. Si muove per infiniti giri circolari, ed appunto come sono quegli infiniti cerchi delle onde, i quali si generano gettando un sasso in un'acqua quieta e crescendo coll'allontanarsi dal centro, si diffondono quanto più possono, se non sono impediti o dalla strettezza del luogo o d'altro intoppo, che non lascia giungere queste onde alla fine del loro destino, ond'è che rimanendo rattenute dagl'intoppi, ripercuotendosi, interrompono le terminazioni delle seguenti. Non altrimenti si estende la voce anche circolarmente: con questa sola differenza che nell'acqua i cerchi si estendono in larghezza orizzontalmente, ma la voce si estende in larghezza e va di mano in mano salendo anche in altezza: laonde, siccome accade nelle terminazioni delle onde, così anche nella voce, quando non vi è intoppo che trattenga la prima, questa non disturba la seconda, nè le altre appresso; ma tutte senza rimbombo giungono egualmente all'orecchio dei primi e degli ultimi. Perciò gli architetti antichi, seguendo le vestigia della natura e riflettendo sulla proprietà della voce, fecero di giusta salita i gradi del teatro, e ricercarono colla proporzione musica e regolare dei matematici il modo, acciocchè qualunque voce giungesse dalla scena più chiara e più soave agli orecchi degli uditori. Poichè, siccome gli istrumenti da fiato o di metallo o di corno, colle giuste distribuzioni si affinano al pari della nettezza dei suoni delle corde; così all'armonia sono state trovate dagli antichi delle invenzioni per accrescere la voce dei teatri ».

In un successivo capitolo espone Vitruvio (2) le regole dell'ar-

---

(1) *Dell'Architettura*, libri dieci di M. Vitruvio Pollione, tradotti e commentati dal Marchese Berardo Galiani. Milano, 1844, libro V, cap. III.

(2) Lib. V, cap. IV.

monia che dichiara aver tolte da Aristossene. A questo proposito notiamo come fin da principio dell'opera (1), nell'esporre le discipline nelle quali deve l'architetto essere perito, accenna alla musica, adducendo, fra le altre cagioni, la seguente: « nei teatri i vasi di metallo, i quali si situano nelle loro piccole camere sotto i gradini con proporzione matematica: e le differenze dei suoni si regolano colle consonanze musicali, distribuiti poi intorno intorno nella quarta, quinta e nell'ottava, ecc., in guisa tale, che la voce del suono, che parte dalla scena, giungendo a percuotere i corrispondenti rispettivi vasi, cresce col rimbombo, e va più chiara e più dolce all'orecchio degli spettatori ».

Ed al luogo accennato (2) ritorna a dire che in base ai principi dell'armonia « si formano i vasi di rame secondo le regole matematiche giusta la grandezza del teatro.... indi, formate le celle fra i sedili del teatro, ivi si situano con distribuzione musica, ed in modo che non tocchino punto il muro, anzi abbiano intorno intorno e di sopra dello spazio. Si pongano anche riversati e dalla parte che riguarda la scena, abbiano un sostegno non meno alto di mezzo piede.

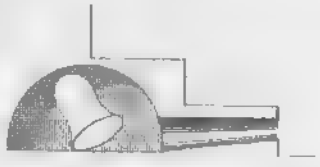


Fig. 19.

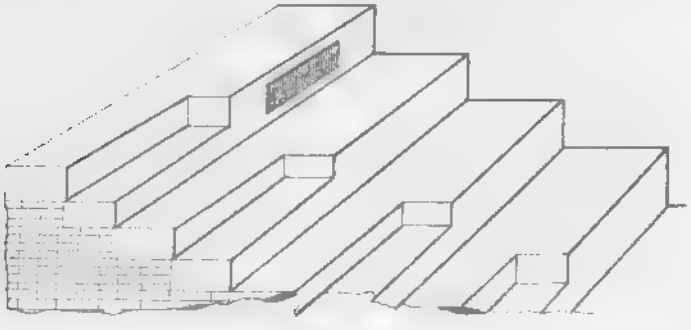


Fig. 20.

In fronte a queste celle si lasciano delle aperture di sopra il piano del grado inferiore lunghe ciascuna piedi due, larghe mezzo ». Erano

(1) Lib. I, cap. I.
(2) Lib. V, cap. V.

questi vasi (1) chiamati dai greci col nome di ἠχεῖα, in forma di campana, proporzionalmente una più piccola dell'altra, acciocchè desse l'una il suono più acuto dell'altra, e servivano soltanto, come chiaramente afferma Vitruvio, per aumentare le voci corrispondenti, non per essere suonati mediante martelli, come si credette erroneamente dal Cesariani, ed in qualche modo anche dal Kirker (2), il quale ultimo del resto, non avendo ben compresa la forma del teatro antico, è caduto in molte inesattezze, che qui sarebbe fuori di luogo il confutare. Le celle ove erano situati i vasi stavano sotto gli stessi sedili, e la bocca, ossia apertura dei medesimi, veniva a corrispondere in faccia alla scena, cioè nel piano verticale del sedile: la forma di questi vasi e la loro posizione in opera porsero argomento a molte discussioni da parte degli studiosi di architettura e di archeologia: abbastanza razionali appariscono le disposizioni, le quali sono indicate nelle nostre figure 19 e 20.

Il Cavalieri nel suo *Specchio Ustorio* (3) già citato, si occupa egli pure, ed a lungo, della forma di questi vasi e della loro posizione in opera. A quest'ultimo proposito egli scrive: « Intenderemo adunque esser la cella O A R (fig. 21) fatta in vôlta ed aperta di sopra, dove è la lettera A, come anche dinnanzi verso l'uditorio, secondo il foro F P, il vaso poi sarà K distante dalla base O R almeno per un mezzo piede, sostentato dai cunei S A, I A; entrerà la voce dunque per il foro A e di lì nel vaso K, dal quale si rifletterà nella cella O A R, uscendo per il foro F P all'uditorio: se altri poi stimasse che il vaso stesse al con-

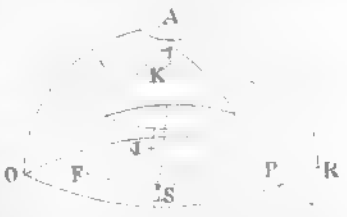


Fig. 21.

(1) Questi vasi non sono da confondersi, come taluno fece, con quegli altri dei quali scrive Erone (Heronis Alexandrini, *Spiritalium* liber. A Federico Commandino urbinate ex graeco nuper in latinum conversus. Urbini, MDLXXV, car. 45) che usavansi pure nei teatri, ma che servivano esclusivamente per produrre il rumore del tuono.

(2) Veggasi nell'opera del Kirker più volte citata il capitolo intitolato: *De Echeis sive phonismis theatri Corinthiaci a Vitruvio descriptis*, pag. 73-77. — Veggansi anche: *Exercitationes Vitruvianae tertiae collectae* cura et opera Joannis Poleni. Patavii, 1741, pag. 293-299. — In questa occasione il Kirker riferisce anche di avere esperimentato con vasi di vetro fatti appositamente costruire; ma il modo nel quale ne parla permette di dubitare della veracità di tale asserzione.

(3) Pag. 135-148.

trario, cioè con la bocca in su, potrà far l'esperienza dell'una e l'altra positura, e vedere quale riesca meglio ».

Vitruvio porge ancora, oltre alle cose riferite, alcune altre regole intorno alla collocazione degli ἠχεῖα, a seconda delle dimensioni del teatro, e quindi chiude il capitolo colle seguenti considerazioni: « Può forse dire alcuno, che molti teatri si sono ogni anno eretti in Roma (1), eppure in nessuno di questi si è osservata veruna di queste regole. L'inganno nasce, perchè non hanno riflettuto che tutti i teatri pubblici così fatti, sono di legno; e hanno tanti intavolati, che per necessità naturalmente rimbombano. Si può ciò ricavare dal vedere che quando le mutazioni cantanti vogliono cantare sui tuoni acuti, si rivoltano verso le porte della scena, coll'aiuto delle quali dànno rimbombo alla lor voce. Ma quando poi si hanno a costruire teatri di materia dura, cioè di cementi, di pietre quadre o di marmo, le quali cose tutte non possono rimbombare, allora è necessario farli colle divisate regole. Se si cercasse ancora in qual teatro si sieno fatte queste cose, dirò che in Roma non ne abbiamo da poter mostrare, ma bensì in vari luoghi d'Italia, e in molte città dei Greci. Sappiamo ancora che Lucio Mumio, smantellato che ebbe il teatro di Corinto, trasportò in Roma i vasi che vi erano di bronzo, e consecrò tutto il bottino al tempio della Luna. Anzi, molti ingegnosi architetti, fabbricando teatri in città piccole hanno in mancanza usati vasi di creta dei già detti suoni e disposti della stessa maniera, i quali hanno fatto ottimo effetto ».

Come in tutto ciò che si riferisce all'acustica degli edifizi, così anche relativamente al vantaggio che avranno potuto trarre gli antichi dall'uso degli ἠχεῖα variano le opinioni dei moderni. Taluno li vuole assolutamente un parto della fantasia di Vitruvio ■ li ritiene ad ogni modo di nessun effetto (2), altri invece li discutono e ne riconoscono l'utilità (3), ed anche a noi pare che un certo rinforzo del

(1) Tutti i teatri eretti in Roma durante il settimo secolo della città furono fabbricati in legno ed erano disfatti di volta in volta dopo terminata la rappresentazione od il corso di rappresentazioni. Il primo teatro di pietra fu edificato da Pompeo nell'anno 55 a. C.

(2) *Le Théâtre* par Charles Garnier, Paris, 1871, pag. 218-219. — *Le nouvel Opéra de Paris*, par M. Charles Garnier. Texte. Deuxième fascicule. Paris, 1879, pag. 183. — Qui pertanto il celebre architetto con un po' di irriverenza si permette di berteggiare Vitruvio, designando gli ἠχεῖα coll'epiteto piuttosto triviale di *casseroles*.

(3) *Storia e descrizione dei principali teatri antichi e moderni*, di Giulio Ferrario. Milano, MDCCCXXX, pag. 134-135. — *Acoustique et Optique*, ecc., par Théodore Lachez. Paris, 1848, pag. 22-23.

suono devono pure averlo prodotto, giacchè deve ammettersi che le masse d'aria in tali vasi contenute saranno entrate in vibrazione sotto l'influenza di certe ondulazioni determinate e che quindi i suoni primitivi non avranno potuto se non rimanere rinforzati da suoni all'unissono. Secondo quanto ci riferisce il Beccega, parrebbe poi che di questo espediente si sia approfittato con successo anche in tempi moderni. Parlando infatti dei vasi di rame usati dai Greci, aggiunge (1): « La stessa conoscenza ha persuaso il celebre architetto Quarenghi ad apporre un semi-cilindro vuoto di questa materia sotto il piano dell'orchestra del grandioso teatro da lui immaginato per l'imperial Corte delle Russie, onde aiutarne la voce e renderlo consuonante ». Ma se così stanno realmente le cose non pare a noi che nell'espediente usato dal Quarenghi debba riconoscersi un'applicazione del principio al quale si informavano gli ἠχεῖα, giacchè quel semi-cilindro non aveva altro effetto se non quello di aumentare la risonanza in genere, mentre invece i vasi degli antichi erano distribuiti con certe proporzioni in modo che in uno od in più di essi trovasse rinforzo una determinata nota. In una recentissima occasione pertanto si era pensato nel caso in cui, a costruzione finita, si avesse riscontrato un difetto di risonanza (2), a ricorrere agli ἠχεῖα; ma l'esperimento non venne neppure tentato.

Nè soltanto dei vasi valevansi gli antichi per rinforzare nei loro teatri il suono ed in particolare la voce; ma ad altri mezzi ricorrevano, mediante i quali rendere percettibile la voce degli attori ad uditori che distavano dalla scena perfino di 40 metri. Era infatti una necessità del teatro antico, vasto com'era, di provvedere con ogni sorta di mezzi artificiali, affinchè le parole pronunziate sulla scena riuscissero intelligibili anche a spettatori che sedevano tanto lontani. Era uno di questi mezzi l'ingrandimento della persona dell'attore per mezzo di alte maschere ■ di costumi. È attribuito ad Eschilo quel complemento della maschera, per cui essa fu trasformata in modo da coprire non solamente la faccia, ma da involgere tutta la testa. Vi erano naturalmente dei fori per gli occhi ■ per la bocca: da alcuni monumenti artistici però apparisce che le aperture per gli occhi non erano più ampie della pupilla dell'attore nascosto dietro la maschera, e parimenti il foro per la bocca era aperto appena un po' più di quel

(1) *Sull'architettura greco-romana applicata alla costruzione del teatro moderno italiano e sulle macchine teatrali.* Venezia, M.DCCC.XVII, pag. XVIII.

(2) *Acoustique et Optique*, par TH. LACHEZ. Paris, 1879, pag. 362, nota (1).

che fosse necessario perchè la voce avesse libero passaggio. Così almeno erano fatte le maschere della tragedia, chè in quelle per la commedia le bocche erano scontorte, spalancate e fornite di labbra formate da una specie di padiglione conico che contribuiva ad aumentare la forza della voce (1).

Narra Cassiodoro nella 51ª delle sue *Epistole*, che la voce degli attori rimaneva, per tale espediente, talmente rinforzata, che si durava fatica a credere che essa uscisse dal petto di un uomo.

Volendo ora formulare un giudizio complessivo sui teatri degli antichi, considerati dal punto di vista dell'acustica, ci sembra di poter conchiudere che la ripercussione del suono non aveva che una parte assai secondaria in teatri per la massima parte interamente scoperti (2), o semplicemente coperti dal *velarium*. Le onde sonore non riflettendosi completamente se non sopra superficie liscie, che presentino almeno una certa resistenza, dovevano trovarsi in gran parte smor-

---

(1) Pare che nei teatri antichi gli attori non parlassero mai col tuono naturale della voce, ma declamassero sempre, leggendosi inoltre che un oratore degli antichi tempi, il quale, in luogo pubblico, arringava il popolo, richiedeva un suonatore di flauto che lo accompagnasse per dirigere il tuono del discorso.

(2) Tutti i moltissimi autori da me consultati asseriscono d'accordo che nessuno degli antichi teatri era coperto. Ciò è erroneo. Nella massima parte i teatri antichi erano scoperti, ma però taluni storici ci tramandarono la memoria di alcuni teatri muniti di tetto. PLINIO (*Historiarum Mundi*, lib. XXXVI, cap. XV) parla d'un teatro coperto nei termini seguenti: « quum theatrum ante texerit Romae Valerius Ostiensis architectus » e FILOSTRATO racconta (PHILOSTRATORUM *quae supersunt omnia*, ecc., illustravit GOTTFRIDUS OLEARIUS, Lipsiae, MDCCIX, pag. 551), che ERODE ATTICO ne fece costruire uno coperto di cedro e così si esprime: « Porro theatrum Herodes Atheniensibus struxit in memoriam Regillae, cum laquearibus ex cedro confectis... de theatro etiam subaqueato, quod Corintiis aedificavit, Atheniensi longe inferius est ». — Il FERGUSSON (*History of the modern styles of Architecture*, London, 1862, pag. 452), ripetendo egli pure dei Greci che « their mechanical appliances did not admit of their adopting a roof » aggiunge: « if we were now to build a place — irrespective of architectural beauty — in which 20,000 were to hear distinctly, we should adapt the plan of a Greek theatre, with probably a section similar to that shown in our figure ». Noi abbiamo riprodotta questa figura, ideata dal FERGUSSON sul modello greco, nella nostra fig. 22.

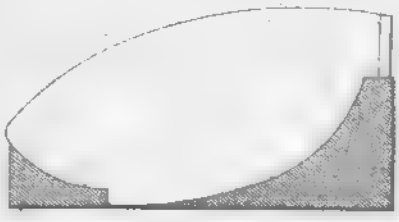


Fig. 22.

zate battendo sopra le ampie vestimenta degli spettatori: dovevano tuttavia essere, quantunque assai debolmente, riflesse dal *velarium* teso al disopra del loro capo per preservarli dagli ardori del sole; ma la ripercussione in questo caso doveva essere di ben lieve importanza, non produrre che un effetto minimo in confronto di quello ottenuto cogli ἠχεῖα, laddove si saranno impiegati: dipendendo inoltre dal modo nel quale il *velarium* sarà stato disposto, argomento questo che porse occasione a tante e tante disquisizioni degli archeologi e non ancora esaurito.

La principale ripercussione pertanto doveva aver luogo contro la parete del muro che costituiva il fondo della scena, e questa ripercussione, a motivo della poca profondità della scena medesima, doveva andar tutta a vantaggio dell'uditorio, il quale veniva così a trovarsi collocato in una doppia serie di onde dirette e di onde riflesse, che procedevano nel medesimo senso e pressochè alla medesima distanza le une dalle altre. Pare adunque che, a questo riguardo, le condizioni di propagazione del suono non potessero essere più favorevoli.

§ II.

Teatri moderni.

L'epoca in cui dai teatri in generale scoperti si passò a quelli coperti, sembra essere stata invero la più notevole per la mutazione della loro forma, poichè allora si presentò agli architetti un gravissimo problema, quello cioè di coprire la sala. Infatti il nostro clima, i nostri costumi, le nostre abitudini ci fecero preferire ambienti interamente chiusi, gli spettacoli da diurni divennero notturni od almeno serali, e così si rese necessaria la soluzione di un altro problema, esso pure, fino a questi ultimi anni specialmente, di difficilissima soluzione, quello cioè della illuminazione. Nei nostri teatri ci si rendono percettibili, o si esige che lo riescano, i suoni più tenui, più delicati; noi abbiamo inoltre mercè i binocoli il vantaggio di godere, a distanze relativamente grandi, delle fisionomie naturali di espressione variata e incomparabilmente più aggradevole di quella che potevano fornire le maschere degli antichi. Le nostre sale molto meno spaziose dei teatri greci e romani, chiuse da

ogni parte, offrono superficie variate di natura e di forma, le cui pareti devono adempiere ad uffici determinati, uffici che importa di conoscere perfettamente ed a fondo, sia per trarne partito, sia per evitare che producano effetti nocivi. Presso di noi, nè gli attori sono muniti di portavoce, nè il teatro contiene vasi risuonanti ed ancora è affatto diverso il genere di trattenimenti ai quali noi assistiamo nei pubblici teatri.

Per tentare di soddisfare alle esigenze create dai nuovi uffici che un teatro è chiamato ad adempiere, e, limitando il problema alla sola parte acustica, se noi ci facciamo a studiare le varie proposte che finora vennero avanzate da una moltitudine di autori, siamo indotti ad una sconsolante conclusione, vale a dire, che riesce quasi impossibile il trovare due scrittori che a tale proposito vadano completamente d'accordo. Noi abbiamo sotto gli occhi un numero straordinario di opere che si riferiscono alla costruzione dei teatri: quasi ogni autore ha la sua proposta, secondo lui, la sola, la unica che valga realmente a raggiungere lo scopo: a suffragio delle sue opinioni egli cita uno o più teatri costruiti in base ai principi fondamentali da lui sostenuti ■ che egli giudica soddisfare in tutto e per tutto alle esigenze più scrupolose dell'acustica, e critica poi acerbamente i teatri di altra forma, i quali d'altra parte sono portati a modello da un secondo autore, partigiano di altre idee ■ di un altro tipo e che alla sua volta censura acerbamente, dimostrando contrari ai principi più elementari della acustica, quelli che dal primo erano proposti come tipo.

Prima di esporre a tale proposito le nostre conclusioni, dedotte in base ai principi d'acustica antecedentemente stabiliti, vogliamo dare una idea di questa straordinaria diversità di pareri, scegliendo, secondo l'ordine cronologico, fra le numerose opere che ci stanno dinnanzi ed avvertendo come il punto principale, intorno al quale si aggirano i diversi pareri, consista nella forma da darsi alla pianta del teatro.

L'Algarotti (1), sull'esempio degli antichi, adotta la figura del semicerchio per essere a suo avviso la più conveniente per un teatro. Il motivo su cui si fonda la sua preferenza è che il cerchio comprende area maggiore in confronto delle altre figure isoperimetre e che gli spettatori collocati all'intorno d'una figura semicircolare sono tutti rivolti verso la scena, sicchè essi la vedono in tutto il complesso, e tutti trovandosi ad uguale distanza dal centro, tutti egualmente vedono e sentono, in qualunque punto del teatro sieno. Non dissimulando tuttavia come la pre-

(1) *Saggio sopra l'opera in musica.* Roma, 1761.

detta figura tragga seco l'inconveniente di dover dare una eccessiva larghezza alla scena, propone di rimediarvi convertendo il semicerchio in una semi-ellisse.

Il Chaumont (1) sostiene non esservi speranza di buoni risultati all'infuori dell'arco di cerchio, e propone quindi una sua stranissima forma di teatro, la cui pianta sarebbe rappresentata da un terzo di cerchio con un angolo rientrante nel palco di mezzo da porsi in faccia alla scena.

Il Cochin (2) per contrario, considerando che le sale teatrali del suo tempo si estendevano soverchiamente nel senso della lunghezza, cosicchè i palchi di facciata alla scena, in migliori condizioni nei rapporti ottici, sono per lo più troppo lontani perchè vi si possa udire distintamente, prende per modello il teatro Olimpico di Vicenza e lo adatta ad una ovale.

La forma ellittica trova uno strenuo propugnatore nel Dumont (3), il quale vorrebbe foggiata ad ellissi non solo la platea, ma altresì in forma d'un mezzo ellissoide anche il soffitto. Fra il circolo e l'ellisse oscilla invece un anonimo (4), dichiarandosi indifferente per l'uno o per l'altra, e di nuovo ritorna al tipo semicircolare degli antichi il Damun (5), propugnando anche la disposizione degli spettatori per gradinate. Dal semicerchio puro si allontana il Roubo (6), proponendo di congiungerlo al proscenio mediante due curve che si vadano allargando. Si giunge così a quel tipo detto a campana, che fu il favorito del Bibbiena; cosicchè, mentre a taluno il tipo semicircolare sembrava fosse da escludersi, perchè richiedeva un troppo largo proscenio, colla forma presente si viene ancora ad allargarlo.

Ma fra coloro, che più apertamente e con maggiore vigoria di più o meno solidi argomenti si pronunziarono per la forma ellittica pura, va notato il Patte (7): dopo aver assoggettate a varie considerazioni le di-

---

(1) *Véritable construction d'un théâtre d'opéra à l'usage de la France, suivant les principes des constructeurs italiens.* Paris, 1763.

(2) *Le projet d'une salle de spectacle pour un théâtre de Comédie.* Paris, 1763.

(3) *Parallèle des plans des plus belles salles de spectacle de l'Italie et de la France.* Paris, 1766.

(4) *Exposition des principes que l'on doit suivre dans l'ordonnance des théâtres modernes,* par M. M. Paris, 1770.

(5) *Nouveau théâtre tracé sur les principes des Grecs et des Romains.* Paris, 1775.

(6) *Traité de la construction des théâtres et des machines théâtrales.* Paris, 1780.

(7) *Essai sur l'architecture théâtrale, ou l'ordonnance la plus avantageuse à une salle de spectacle relativement aux principes de l'optique et de l'acoustique, avec un examen des principaux théâtres de l'Europe.* Paris, 1782.

verse forme, così egli si esprime: « solo questa forma (cioè l'ellittica) riunisce in sè tutti i vantaggi che deve offrire un teatro, poichè essa è precisamente quella che possiede nel massimo grado la proprietà di riunire in un fuoco o nelle sue vicinanze tutti i raggi sonori che vengono originati nell'altro ». In base a queste conclusioni egli dà al suo ideale di teatro la forma di una ellisse che va a troncarsi nel proscenio per porre il centro fonico in uno dei fuochi.

Il Saunders (1) invece, più volte citato nel corso del presente lavoro, disapprova esplicitamente le idee di Patte, propone la forma di tre quarti di cerchio, colla quale, anche restringendo la bocca-scena, si utilizza il massimo spazio per gli uditori, e proscrive la forma semi-circolare perchè richiede una troppo grande larghezza per il proscenio. Non crede poi che il soffitto eserciti alcuna influenza sulla riflessione del suono, per la qual cosa ritiene affatto indifferente il foggiarlo a piano piuttosto che a vôlta.

Ma ecco che invece il Langhans (2) in un primo lavoro si scaglia contro gli argomenti addotti dal Saunders, abbraccia espressamente le opinioni di Patte e di Dumont e si dichiara egli pure con molto calore per la forma ellittica (3); ma in un secondo lavoro, particolarmente dedicato allo studio dell'acustica dei teatri, abbandona la forma ellittica, abbraccia la forma circolare e leva a cielo le proposte di Saunders.

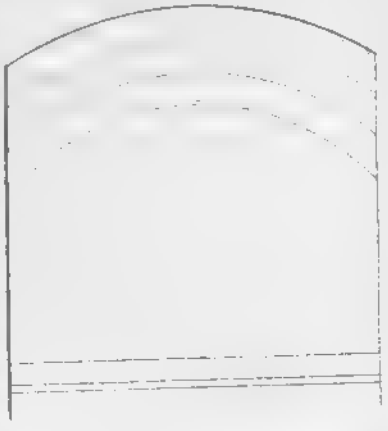


Fig. 23.

Originale poi fra le altre apparisce la proposta del Rhode (4), che più e più volte abbiamo avuto occasione di menzionare e di citare: ed a motivo di tale originalità crediamo opportuno di riprodurre in una apposita figura lo schema di teatro, che, secondo il Rhode, avrebbe meglio

(1) *A treatise on theatres including some experiments on sound.* London, 1790.

(2) *Vergleichung des neuen Schauspielhauses zu Berlin, mit verschiedenen ältern und neuern Schauspielhäusern in Rücksicht auf akustische und optische Grundsätze.* Berlin, 1800.

(3) *Ueber Theater oder Bemerkungen über Katakustic in Beziehung auf Theater.* Berlin, 1810.

(4) *Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler.* Berlin, 1800.

d'ogni altro soddisfatto alle esigenze acustiche (fig. 23). Propone egli infatti di costruire un teatro con due pareti parallele spoglie affatto di palchi o loggie, ed opina che per tal modo il suono verrebbe come condotto da esse pareti ad un uditorio, che potrebbe opportunamente disporsi ad arco di cerchio (1). Appunto sulla teoria della condotta del suono per tubi fa egli riposare il suo ragionamento, e si meraviglia che non sia caduto in mente ad alcuno di approfittare di tali spedienti.

Che la forma da assegnarsi alla pianta debba essere semicircolare pone assolutamente fuori di dubbio lo Stratico in alcune sue avvertenze inedite (2) intorno alla costruzione dei teatri, nelle quali leggiamo: « È di per sè manifesto che la curva teatrale debba essere un semicircolo, perchè ognuno sa che dove molti vogliono ascoltare uno che parla, senza essere da alcuno a ciò precettati, si dispongono a semicerchio intorno all'attore o suonatore che è nel centro ».

Con copia di argomenti e con criteri scientifici discute le varie forme da darsi alla pianta d'un teatro il Chladni (3). La forma semi-circolare o semi-ovale, scrive egli, che si assegna ordinariamente ai teatri, è conveniente per contenere molte persone ad una distanza modica dal luogo, nel quale si genera il suono; ma la forma d'un antico teatro di Atene (4), a pareti divergenti (forma che noi riproduciamo nella nostra fig. 24), potrebbe contenere una assemblea ancor più nume-

(1) È singolare l'errore nel quale cadde il Rhode, trattovi da una fallace indicazione dello Stieglitz (*Encyclopädie der bürgerlichen Baukunst*, Berlin, 1790, pag. 614) e che, sulla fede del Rhode medesimo, venne ripetuto da molti altri scrittori. Egli crede cioè che l'antico teatro di Parma abbia una forma consimile a quella da lui proposta, mentre invece realmente la pianta ne è formata da due linee parallele, riunite mediante un semicerchio, da cui risulta un portico in faccia alla scena, ed è contornato da quattordici gradini elevati sopra un piccolo piedistallo o basamento coronato da una balaustrata. Veggansi infatti l'opera del Buttigli, intitolata: *Descrizione dell'apparato per le nozze di Odoardo Farnese e Margherita di Toscana*, Parma, 1629; e l'altra del Donati: *Descrizione del gran Teatro Farnesiano di Parma. Notizie storiche sul medesimo*. Parma, 1817.

(2) Biblioteca Marciana di Venezia. Cod. cccxxxiv della classe IV (*Ital.*).

(3) *Die Akustik*. Leipzig, 1802, §§ 208, 210.

(4) Di questo antico teatro, menzionato da molti autori dello scorso e del presente secolo sotto il nome di *Pnyx*, non siamo riusciti a trovare precise notizie presso gli scrittori dell'antichità. Noteremo tuttavia che nella tavola III^a^, annessa all'opera *Storia e descrizione dei principali teatri antichi e moderni*, per cura del dottore Giulio Ferrario, si contiene un disegno in prospettiva dell'*Odéon*, eretto da Pericle, dal quale si rileva una disposizione affatto consimile a quella dello *Pnyx* testè accennata.

rosa alla medesima distanza. Aggiunge che di tutte le forme che possono darsi ad un teatro, perchè esso offra buone condizioni acustiche, la ellittica è la più svantaggiosa. E così appoggia tale sua opinione. Qualità precipua dell'ellisse è di riunire in un fuoco tutti i raggi che partono dall'altro fuoco: ora se fosse possibile di concentrare in un fuoco una orchestra, e tutto il pubblico nell'altro, il suono secondario sarebbe fortissimo, ma senza alcuna utilità, poichè se la sala è piccola non si ha bisogno alcuno di rinforzare il suono, e se è grande si intenderà il suono secondario più tardi del primitivo, a meno che l'ellisse non fosse molto allungata. Quando il suono è prodotto ed inteso fuori dei fuochi, la risonanza e l'eco si manifestano sotto forme svariatissime. A Berlino il teatro e la sala da concerti, ellissoidi regolari, potranno servire per osservare gli effetti della forma ellittica. Una forma rotonda non sarebbe pure conveniente a motivo delle riflessioni molteplici. Allorquando si tratta di intendere dappertutto distintamente un oratore o un cantante o uno strumento, una forma parabolica delle pareti e del soffitto sarà convenientissima: si potranno far terminare i due rami della parabola in due rette parallele: il suono dovrebbe essere prodotto nel fuoco della parabola; cosicchè tutto quello che non perviene direttamente al pubblico, gli perverrebbe riflesso in direzioni parallele all'asse. Fin qui adunque il Chladni.

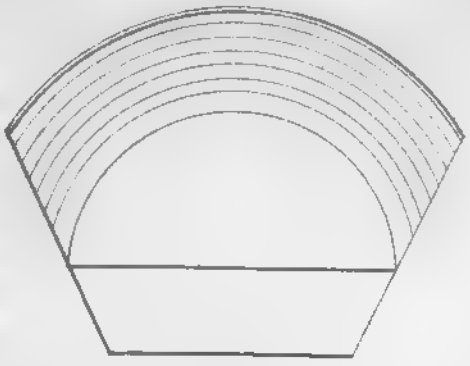


Fig. 24.

La inopportunità così della forma ellittica, come di questa parabolica proposta dal Chladni, è sostenuta dall'Herschel (1).

Dopo ciò, proseguendo la rapida nostra rassegna, troviamo propugnata dal Catel (2) la forma di anfiteatro sopra pianta di mezza corona circolare che col diametro minore si chiuda contro la scena co-

(1) *Encyclopaedia Metropolitana*, vol, 25, pag. 753.
(2) *Vorschläge zur Verbesserung der Schauspielhäuser*. Berlin, 1802.

perta da una mezza sfera. Il Weinbrenner (1) invece, abbraccia quasi completamente le idee e le proposte del Saunders.

D'altra parte le norme vitruviane trovano un ardente seguace nel Beccega (2).

Il semi-cerchio perfetto, dai cui estremi partono delle curve, che vanno restringendosi verso il proscenio, od in altre parole la forma a ferro di cavallo, raccoglie tutti i suffragi del Landriani (3); finalmente tutte le forme, ad eccezione del cerchio e dell'ellissi puri, sono dal Donnet (4) dichiarate perniciose alle buone condizioni acustiche di un teatro in genere.

Il Mariani (5) d'altra parte assegna alla pianta del suo teatro una forma esattamente uguale a quella descritta da Vitruvio per il teatro greco, e che a suo luogo abbiamo con ogni particolare esposta, ed aggiunge: « La costruzione della vôlta esige una grandissima cura, essendo provato essere questa molto favorevole a rendere più o meno armonico un teatro, a seconda della curva che per questa si adopera. Tutti convennero che la forma ellittica è la migliore per la proprietà che hanno tutte le figure concave di raccogliere le onde sonore e dolcemente rimandarle. La vôlta dev'essere di legno e le connessure dei vari pezzi fatta con grande precisione ».

Come mai raccappezzarsi in questo caos senza un filo direttivo? Il Garnier, il celebre architetto del grandioso nuovo teatro dell'Opéra di Parigi, rimase talmente scoraggiato dallo studio delle opere di architettura teatrale, nelle quali potè riscontrare tante contraddizioni, contraddizioni tradotte quasi tutte nella pratica mediante effettive costruzioni di teatri secondo i vari tipi accennati, che uscì a dichiarare non aver egli fede alcuna nella acustica pratica. L'acustica, dichiara troppo

---

(1) *Theater in architektonischer Hinsicht mit Beziehung auf Plan und Ausführung des neuen Hoftheaters zu Carlsruhe*, 1809.

(2) *Sull'architettura greco-romana applicata alla costruzione del teatro moderno italiano e sulle macchine teatrali.* Venezia, MDCCCXVII.

(3) *Storia e descrizione dei principali teatri antichi e moderni, corredata di tavole, col saggio sull'architettura teatrale*, di M. Patte, illustrato con erudite osservazioni del chiarissimo architetto e pittore scenico Paolo Landriani. Per cura del dottore Giulio Ferrario. Milano, MDCCCXXX.

(4) *Architectonographie des théâtres de Paris ou parallèle historique et critique de ces édifices.* Paris, 1857.

(5) *Progetto di un teatro moderno e nozioni generali intorno la costruzione di questo.* Corredato di quattro tavole in rame di Carlo Mariani. Milano, 1846, pag. 44.

recisamente il Garnier (1), è una scienza da laboratorio, che diventa nulla nelle questioni pratiche, e sopratutto quando si preoccupa della sonorità delle sale per spettacoli. Indi prosegue: « Mi si è chiesto tante volte se il nuovo teatro dell'Opéra riuscirà in buone condizioni acustiche e quali sieno stati i principi che mi guidarono nella costruzione di esso nei riflessi della sonorità, che io devo dichiarare di non aver avuta alcuna guida, che non ho adottato alcun principio, che non mi sono appoggiato ad alcuna teoria e che dal caso soltanto attendo l'insuccesso o la riuscita ». Che più, nella recentissima occasione nella quale si costruì a Vienna il nuovo teatro dell'Opera, gli architetti, dando alla luce una splendida descrizione illustrativa del loro lavoro (2), ben si preoccuparono di render conto della storia della costruzione, delle varie parti dell'edifizio, della ventilazione, del riscaldamento, delle condotte d'acqua e della illuminazione, ma non arrischiarono a dir verbo della questione acustica, quantunque consti positivamente che se ne occuparono con tutto l'impegno, e certi panneggiamenti stesi sopra le pareti liscie ed alcune altre disposizioni di simil genere appalesino al visitatore intelligente che le buone condizioni acustiche di quell'ambiente non sono dovute semplicemente al caso, al quale si rimetteva il Garnier. Il quale Garnier, è bene aggiungere tosto, in una più recente pubblicazione relativa al grandioso teatro da lui costruito, tornando sopra la questione della forma data alla sala, lascia comprendere che nel lasciarsi guidare dal caso, egli non era senza un filo direttivo, e questo filo direttivo era rappresentato dall'antico teatro dell'Opéra (3), in buone condizioni acustiche od almeno discrete, del quale egli adottò presso a poco la forma, giovandosi ancora di alcuni criteri che egli aveva potuto formarsi in seguito alla visita da lui fatta a tutti i principali teatri di Europa. Anche in questa seconda e notevolissima pubblicazione però il Garnier manifesta la medesima diffidenza espressa parecchi anni prima per tutto che si riferisce all'acustica pratica.

Questa assoluta sfiducia pertanto non è condivisa dall'Istituto Ve-

(1) *Le Théâtre*, par CHARLES GARNIER. Paris, 1871, pag. 211-212, 219.

(2) *Das neue Opernhaus in Wien erbaut von den Architekten* VAN DER NÜLL *und* SICCARDSBURG. *Vollendet von* G. GUGITZ. *Und Beschreibung nach den interlassenen Aufzeichnungen* SICCARDSBURG's (Separat Abdruck aus der *Allgemeinen Bauzeitung*). Wien, 1878.

(3) *Le Nouvel Opéra de Paris*, par M. CHARLES GARNIER. Texte. Deuxième fascicule. Paris, 1879, pag. 150.

neto, il quale si indusse a mettere il grave tema a concorso, non è condivisa da noi, che ci siamo accinti a tentare la soluzione del gravissimo problema.

Cominciamo pertanto dal notare quali sieno i più salienti difetti che si rimproverano a molti dei nostri teatri, e che dipendono dalla forma generale loro assegnata; esporremo in seguito le nostre idee intorno agli elementi ai quali, nello studio di progetto d'un teatro, dovrà aversi principale riguardo, perchè esso venga a trovarsi nelle migliori condizioni acustiche desiderabili; chiudendo poi con talune osservazioni, le quali, quantunque non riguardino direttamente il progetto fondamentale della sala, pure hanno non lieve influenza sul modo nel quale, una volta compiuto, esso si presterà alla uniforme diffusione ed alla distinta percezione dei suoni.

I nostri teatri sono disposti per modo che talvolta la ripercussione delle onde sonore è intempestiva, e raramente utile: le onde si incrociano con danno dell'armonia che si vuol produrre, oppure le riflessioni arrivano così tardi da produrre una mescolanza disaggradevole fra i suoni che dovrebbero essere estinti e quelli che li hanno seguiti. Avviene ancora che alcuni punti di certe sale si trovano, rapporto al centro fonico, in posizione tale da far sembrare agli uditori in essi situati che i suoni provengano da un centro diametralmente opposto, o sotto un angolo qualunque col centro vero. Questi punti strani si trovano nei *nodi* delle onde sonore dirette dove il suono è nullo, e nei *centri* delle onde riflesse, dove il suono si manifesta intempestivamente. L'organo dell'udito non è colpito sensibilmente che dall'onda che ritorna dopo un certo tempo più o meno breve, e pressochè affatto dall'onda diretta. Quante sale, nelle quali la voce degli attori sembra venire, non già dal posto che essi occupano, ma da punti collocati al di dietro degli uditori, o al di sopra delle loro teste!

Questo inconveniente si traduce in certi casi con risuonanze nocive, in certi altri con echi ben distinti ed ancor più disaggradevoli.

In genere però non sono questi ancora i difetti più salienti dei nostri teatri, ed anche se realmente si possono rimproverare a molte sale, essi tuttavia non si manifestano d'ordinario in tutti i punti della sala indistintamente. Il difetto più grave, che più di frequente si rimprovera ad un teatro, è la mancanza di sonorità: si dice che il teatro è sordo, volendo con ciò significare che i suoni più delicati non riescono ad essere percepiti, e che gli altri appena emessi vengono come smorzati; e quando tale condizione si verifichi, può

dirsi che, se non tutti, certamente la maggior parte degli spettatori ne risentono i tristi effetti.

Altre cause vengono ad esercitare una dannosa influenza sulla propagazione del suono nei teatri, e queste con tanto maggiore intensità, perciò che agiscono più direttamente in prossimità al centro fonico. Le vaste estensioni delle scene e delle quinte, occupate da una quantità di tele pendenti, assorbono una grande quantità di suono, con danno degli effetti che dovrebbero attendersene. Già una notevole differenza esiste fra l'effetto delle sinfonie eseguite a telone calato, prima del principio dello spettacolo, e l'effetto di questi stessi pezzi musicali, allorchè il sipario è alzato (1): i cantanti sono meglio intesi allorchè si portano sul davanti della scena, che non quando ne occupano il fondo, ed ognuno può avere osservato quanta sia la differenza degli effetti quando la scena è più o meno vicina alla bocca d'opera. E che dovremo dire di quella deplorabilissima abitudine di aprire dei palchi lateralmente alla bocca medesima, palchi chiamati giustamente dal Zamminer vere trappole, nelle quali i suoni vengono a strangolarsi?

Ora, se noi ci facciamo a studiare le moltissime opere che, particolarmente sul finire dello scorso secolo ed al principio del presente, furono pubblicate intorno alla costruzione dei teatri, ed alle avvertenze da aversi affinchè in essi le esigenze acustiche sieno soddisfatte nel miglior modo possibile, noi riconosciamo che tutti indistintamente gli autori posero in prima linea, come elementi principali a cui avere speciale riguardo:

1° la forma da darsi alla pianta della sala;
2° la forma da darsi al soffitto.

Gli studi di acustica da noi istituiti pertanto ci portano ad una conclusione affatto diversa, conclusione che, di fronte a tante autorità, non avremmo il coraggio di enunciare, qualora essa non ci sembrasse avere una base ben solida sui principi scientifici antecedentemente esposti.

A stretto rigore di termini noi dobbiamo anzitutto istituire distinte considerazioni, a seconda della destinazione del teatro, distinguendo cioè il caso in cui si tratti di un teatro di commedia, dall'altro, in

(1) Questo fatto venne posto in piena evidenza dal GARNIER. Cfr. *Le Nouvel Opéra de Paris*, ecc. Paris, 1879, pag. 192.

cui la sala sia destinata a spettacoli musicali; poichè, mentre nel secondo caso una certa sonorità è desiderabile per una buona fusione dei suoni, nel primo sarebbe nociva, giacchè, come ripetutamente abbiamo osservato, per essere nettamente intesa, la parola deve arrivare all'organo dell'udito, semplice e senza accompagnamento. Ora, il difetto e non l'eccesso di sonorità costituisce il più grave degli inconvenienti che d'ordinario si presentano in un teatro, ed è ben raro, come con mirabile accordo affermano gli uomini competenti in materia, che una sala teatrale, qualunque sia la sua forma, si trovi in condizioni acustiche tanto cattive da far sì che le parole nettamente pronunziate sulla scena, sole e senza possibile confusione, non sieno nettamente intese.

Senza dubbio vi sono dei teatri nei quali la voce umana non arriva in tutti i punti col medesimo grado di intensità e di finezza, ma siccome non vi ha confusione possibile, siccome mai due attori parlano ad un tempo, nè mai accompagnamenti più o meno rumorosi rompono la frase che viene pronunziata, così si può affermare che in realtà tutte le sale tearrali sono presso a poco abbastanza buone da permettere alla voce dell'attore di venire liberamente alle orecchie degli spettatori. Quando ciò non avvenisse, la causa dovrebbe ravvisarsi in un eccesso di sonorità, eccesso che con tutta facilità può togliersi, ricorrendo ad uno di quegli espedienti di assorbimento del suono, dei quali abbiamo a lungo tenuto parola.

Quando il teatro sia destinato a trattenimenti musicali, ben più gravi divengono le preoccupazioni dell'architetto, ma nemmeno in questo caso noi crediamo che il nodo della questione stia completamente nella forma da darsi alla pianta della sala. Nella forma della sala infatti noi vediamo un problema principalmente ottico e di comodità, il quale dipende sopratutto dalle proporzioni dell'ambiente e dal numero di spettatori che in esso dovranno trovar posto: e quando siasi risolto in modo soddisfacente il doppio problema di visibilità e di comodità, crediamo pure che sia risolto il problema acustico, in quanto può influenzarlo la forma della sala.

Infatti, per non correre pericolo che in alcun punto della sala si abbiano echi o risonanze disaggradevoli, converrà non contare affatto sulle onde riflesse, ma soltanto sulle onde dirette, rinforzate nel luogo di emissione. Ecco il principio fondamentale che, secondo il parer nostro, deve prefiggersi un architetto nel progetto d'un teatro. In verità, quando si leggono quelle cosi sottili disquisizioni intorno alla curva da assegnarsi alla pianta d'un teatro, non parrebbe forse doversi trattare di

una superficie curvilinea continua, sulla quale venissero continuamente a battere le onde sonore, anzichè, come realmente è, di una specie di gabbia (1), nella quale quei palchi, quelle decorazioni fra palco e palco, quelle gallerie, e perfino quelle tende, sono disposizioni che, con lodevolissima opportunità, gli architetti del teatro moderno, forse senza saperlo, hanno provvidenzialmente introdotto, allo scopo di impedire riflessioni, le quali condurrebbero ad echi ed a risonanze perniciosissime?

Lo stesso criterio deve ancora applicarsi alla forma da darsi al soffitto del teatro. A che tanti studi e tante sottili discussioni sulla forma da asseguarsi, o ellittica o parabolica, quasicchè tutte le svariate fonti dei suoni si potessero poi concentrare in un punto, o, peggio ancora, come se si trattasse di riflettere i suoni in punti determinati, o non piuttosto la gravità del problema consistesse appunto nel far sì che il suono si distribuisca equamente in tutto l'ambiente!

Secondo il criterio nostro, a due soli elementi deve aversi riguardo: anzitutto, e sopra ogni cosa, a veder modo che nel soffitto non vengano a trovarsi corpi d'aria isolati, i quali, vibrando di vibrazioni proprie, dieno luogo a dannose risuonanze; in secondo luogo ad osservare la regola risultante dalle esperienze dello Scott Russell, regola che, relativamente ai soffitti, è enunciata dal Fergusson nei termini seguenti (2): « that, if any sound is reflected back from it at an angle of 45 degrees, it produces indistinctness of hearing on the part of the audience, and it must therefore be so constructed that this shall not be the case ». Sopra altre avvertenze da aversi nella disposizione del soffitto, torneremo fra poco.

Per noi adunque, lo ripetiamo, il nodo principale della questione acustica dei teatri sta tutto nel non contare sulle onde riflesse, ma soltanto *sulle onde dirette, rinforzate soltanto nel luogo d'emissione.* Vediamo ora in qual modo potrà più opportunamente risolversi il problema posto in questi termini.

Dalla storia dei teatri moderni si rileva che nelle primitive loro costruzioni accostumavasi di porre due o tre file di sedie ai lati del palcoscenico, ove collocavansi le persone più distinte per assistere

(1) Siamo lietissimi di constatare che questa nostra idea trova indirettamente conferma in quanto scrive il BLASERNA nell'opera *La teoria del suono nei suoi rapporti colla musica.* Milano, 1875, pag. 36-37.

(2) *History of the modern styles of architecture.* London, 1862, pag. 453.

alle rappresentazioni, persone le quali restavano per tal modo quasi confuse cogli attori; questo sconcio in seguito fu tolto, non però completamente: poichè ne è una traccia l'uso dei palchetti di proscenio, palchetti i quali, come già abbiamo incidentalmente notato, nuocciono alle buone condizioni acustiche del rimanente del teatro. Fedeli quindi al nostro generale sistema, vale a dire che, prima di pensare ai mezzi di rinforzare il suono, è mestieri togliere gli ostacoli che alla propagazione di esso si oppongono, notiamo che, anzitutto, questo gravissimo inconveniente, il quale ne trae seco molti altri, deve essere tolto completamente.

Fra gli inconvenienti che quello testè accennato trae seco, havvene un altro non meno grave. L'orchestra propriamente detta non è tale se non in quanto essa viene formata dalla unione dei suonatori, del resto non ha oggidì un posto che la distingua dagli spettatori, occupando essa parte della platea, che potrebbe, mediante opportuna disposizione del suolo di questa, essere più ragionevolmente occupata dagli spettatori medesimi. Essendo la platea e l'orchestra cose ben diverse, il loro posto dovrebbe essere distinto dalla architettura medesima, ciò che può effettuarsi nei teatri, senza portare alcuna alterazione alla stabilita forma generale interna, cioè trasportandola nello spazio del moderno proscenio, nel quale avrebbe un posto distinto, reclamato dal buon senso, senza portare sconcerto alcuno agli spettatori della platea, diminuendo anzi, per quelli situati nei palchi, l'inconveniente di vedere di fianco gli attori e di sbieco le decorazioni. Questa trasposizione dell'orchestra obbliga necessariamente a trasportare anche il proscenio, ciocchè tornerà utilissimo, poichè, collocato che sia il proscenio in luogo ove nessun legame abbia colla decorazione della platea, potrà darsi ad esso quella forma che meglio conviene allo scopo nostro.

Ecco adunque come, seguendo tali concetti, venga a trasformarsi la bocca-scena, e come da tal forma vengano a ricevere rinforzo le onde dirette di suono (1).

(1) Veggasi a tale proposito una memoria inserita dal prof. Basile negli *Atti del Collegio degli Ingegneri ed Architetti di Palermo*. Fasc. I. ottobre 1878, pag. 23 e 25, la quale del resto ci sembra accordarsi nei punti più essenziali collo scritto del Taccani già citato ed intitolato: *Sulla forma della platea e del proscenio di un teatro più propria alla propagazione del suono e sulla materia più atta a rinforzarlo ed a sostenerlo, premesso un esame della teoria acustica*. Milano, 1840, pag. 55-61.

Nella fig. 25, A rappresenta la nuova posizione del proscenio, B la nuova posizione dell'orchestra, *b t s d* la proiezione di una vôlta armonica che si estende sopra ambedue, *b c t n* la inquadratura del proscenio, *x* ed *y* palchetti distinti, i quali si assegnano d'ordinario alla direzione teatrale ed al Municipio.

Con tale disposizione adunque la scena A rimane svincolata dall'uditorio, il quale invece, nelle disposizioni ordinariamente in uso, prendeva posto anche in *b c t n*: ed inoltre, e sopratutto la voce del cantante in A rimane rafforzata dalle vibrazioni immediate che avvengono nelle pareti laterali perfettamente liscie *b c*, *t n*, e finalmente ancora, sotto il punto di vista acustico, l'orchestra in B non occupa parte della platea e rimane sotto la vôlta armonica che ricopre tutto lo spazio occupato dal proscenio e dalla orchestra medesima. Ai riguardi ottici poi si guadagnerebbe ancora che le persone nei palchi *x* ed *y* si troverebbero avanti alla scena e potrebbero quindi avere gli attori di fronte.

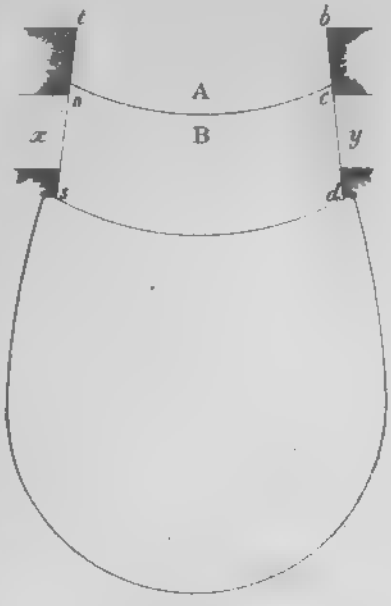


Fig. 25.

Noi crediamo fermamente che, adottandosi una tale disposizione, si avrebbero rinforzate le onde dirette di suono provenienti sia dai cantanti, come dall'orchestra, in modo da mettere in buone condizioni acustiche i teatri i quali non eccedano i limiti naturali di dimensioni entro cui simili ambienti devono restare giudiziosamente compresi.

A completare pertanto la esposizione dell'argomento rimarrebbe a dire alcun che intorno alla vôlta armonica testè accennata e che ricopre insieme proscenio ed orchestra.

A tale riguardo noi ci dichiariamo disposti ad abbracciare l'opinione del Basile testè citato, il quale, partendo dai dati sperimentali dello Scott Russell ed avvertendo, come già abbiamo incidentalmente notato nella seconda parte del presente lavoro, che uguali risultati si sono sperimentati per le vôlte e per i soffitti, esprime saggiamente l'avviso che

la inclinazione del cielo della così detta cicloide deve avere lo scopo di riflettere i raggi sonori sotto un angolo minore possibile. Lo scopo della cicloide infrattanto è doppio: evitare gli effetti nocivi della riflessione. ottenere quelli utili della vibrazione; e si sa che la parola cicloide è qui impropria, poichè la curva direttrice dell'intradosso delle vôlte sonore della maggior parte dei teatri è una policentrica, talvolta un arco di cerchio e tal'altra una ellisse. Meglio ancora, aggiunge saggiamente taluno, se si avesse o si potesse avere una grande piattabanda, o, quanto meno, una curva di grandissimo raggio, cosa questa che, coll'attuale sistema di costruzioni metalliche in uso, sarà sempre facilissimo di ottenere, e ciò ad evitare la formazione di fuochi acustici, i

Fig. 26.

quali per uditori posti in determinati punti della sala sarebbero causa di echi molto intensi. Rappresenti la fig. 26 una sezione longitudinale della bocca-scena, e sia *a b* la posizione ordinaria del proscenio, *a' b'* quella secondo il nuovo sistema che si propone.

Ciò premesso, ecco le conseguenze che ne deduce il Basile già citato:

1° La quantità di raggi sonori emessi dal punto *c'* compresi nella quantità angolare *s' c' t'* può esser riflessa, mediante una conveniente inclinazione della *s' t'* sotto un angolo minore di quello sotto il quale si riflettono nel soffitto della sala *t' t* i raggi che partono dal punto *c* e che sono compresi nell'angolo *t' c t*. I soli raggi compresi nel settore *s c t'* possono avere lo stesso angolo d'incidenza di quelli che partono da *c'*. Se il soffitto *t' t* seguisse la inclinazione della ge-

neratrice della vôlta sonora si avrebbe un effetto architettonico incompatibile nella sala dell'editorio;

2° Posto il cantante in c', la vibrazione viene promossa direttamente in tutta intera la vôlta sonora che gli resta avanti; mentre, quando egli fosse collocato in c le tavolette vibranti della vôlta, testè menzionata, rimarrebbero fuori dell'azione diretta delle onde sonore;

3° Quanto alla nuova posizione dell'orchestra sotto la vôlta sonora, è facile rilevare che le riflessioni le quali ne risultano sono più svantaggiose nell'antica posizione che non nella nuova.

Infatti sieno $a\,t$ (fig. 27) la sezione della cicloide, $a\,o$ quella del soffitto della sala, m ed m' le origini del suono rispettivamente nel

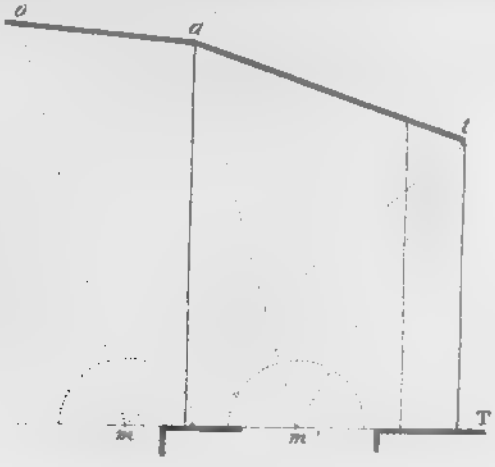


Fig. 27.

sistema ordinario ed in quello nuovo. Considerando i raggi sonori compresi nello spazio angolare $T\,m'\,a = T\,m\,o$ si ha:

$$T\,m'\,a = a\,m'\,t + t'\,m'\,T$$

$$T\,m\,o = o\,m\,t + t\,m\,T$$

ma

$$t\,m\,T < t\,m'\,T$$

dunque

$$o\,m\,t > a\,m'\,t.$$

D'onde si ricava la conseguenza che nella nuova disposizione la quantità delle riflessioni è minore di quella che avviene nell'antica, secondo la quale ultima ancora una quantità di raggi si riflette nel soffitto della sala e produce una maggiore confusione.

Analizzato così il lato, che noi giudichiamo principale, della questione, veniamo all'esame di alcune altre circostanze, le quali, per quanto accessorie di fronte a quella testè discussa, sono tuttavia per loro medesime di non lieve importanza.

Quantunque noi non dividiamo tutte le apprensioni di molti autori per i danni che alle condizioni acustiche d'una sala da teatro derivano dal sistema attuale di illuminazione della rampa, pure non possiamo a meno dal notare che per certo un'influenza assai dannosa è da tale circostanza esercitata, allorchè la ventilazione si faccia imperfettamente, come accade in molti teatri, con aspirazione dalla scena attraverso il foro, dal quale si cala il lampadario. È un fatto che non si può negare; sporgendo il capo da questo foro, nell'onda di intenso calore si distinguono i suoni più delicati che partono dalla scena o dall'orchestra. Il Garnier, col suo scetticismo in fatto di acustica pratica, nega anche questo fatto (1): è ben vero, dice egli, che al disopra del lampadario si distingono perfettamente i suoni, meglio che non nella platea o nei palchi di prima fila, ma questi suoni si intendono altrettanto bene in qualsiasi parte del soffitto della sala: il Garnier asserisce anche di aver istituito delle esperienze a questo proposito, e lo crediamo; ma crediamo del pari che se egli non le avesse limitate ai teatri d'opera e le avesse ripetute in teatri di commedia, dal foro del lampadario avrebbe potuto intendere perfettamente, come noi abbiamo inteso, la voce del suggeritore, la quale, per contrario, non riesce percettibile da alcun punto del soffitto della sala. Noi quindi dobbiamo ammetterlo, il sistema della illuminazione della rampa combinato col lampadario è nocivo alle condizioni acustiche dell'ambiente; quella corrente fortissima d'aria, che viene per tal modo a formarsi, non può essere senza una qualche influenza sulla propagazione della voce degli artisti, che rimangono così, mediante la corrente, separati, in certo qual modo, dall'uditorio (2). Mentre invece, ci

(1) *Le Théâtre*, par CHARLES GARNIER. Paris, 1871, pag. 215-216.

(2) Accurate esperienze eseguite dal Faraday, ed i cui risultati sono consegnati nell'*Evidence taken before a select Committee to consider the best modes of ventilating and warming the New Houses of Parliament*, posero in chiaro che una corrente d'aria la quale montava dal basso delle sale al soffitto bastava a rendere inintelligi-

affrettiamo ad aggiungerlo, un sistema diverso di ventilazione, quale vien pure praticato in taluni fra i teatri di recente costruiti, mentre migliora e di molto le condizioni igieniche dell'ambiente, ripartito equamente nei vari punti della sala, sarà pure di giovamento alle buone condizioni acustiche di essa. A questo proposito pertanto ci limiteremo a notare essere oggidì ammesso che l'aria nei teatri debba essere continuamente rinnovata durante e rappresentazioni, indipendentemente affatto dai corridoi e dalla scena: questo scopo si raggiunge mediante la insufflazione combinata colla aspirazione, solo procedimento efficace per distribuire convenientemente la quantità d'aria necessaria.

Per esaurire poi anche l'argomento della illuminazione rispetto all'influenza che può derivarne alle condizioni acustiche del teatro, noteremo che, secondo il giudizio degli uomini più competenti e dello stesso Garnier (1), la moderna innovazione, consistente nell'illuminare il soffitto, od in altre parole, il cosidetto sistema dei *plafonds lumineux*, deve proscriversi non solo sotto il punto di vista decorativo, ma altresì nei riflessi dell'acustica.

Si è infatti osservato, e assai giustamente, che quella immensa superficie di vetro che copre pressochè tutta la vôlta non può non esercitare una certa influenza sulla riflessione, sulla qualità e sulla intensità dei suoni. Sotto la parete di vetro si stende uno strato di altezza variabile, a seconda del grado di potenza dato alle fiamme a gaz, e che è composto d'aria calda, e per conseguenza assai dilatata. I suoni che, dopo aver attraversato l'ambiente della sala, incontrano questo strato, si rifrangono e subiscono una variazione di velocità, poi una nuova rifrazione avrà luogo quando abbandonano quello strato per ridiscendere nella sala. Ora, se anche questa doppia rifrazione e le conseguenti variazioni di velocità non importassero che differenze di frazioni di secondo, esse potrebbero bastare in alcuni casi per alterare la purezza dei suoni, riuscendo perniciose alla perfetta e distinta audizione di essi.

Per ciò che risguarda gli spettatori che si trovano nei palchetti,

---

bile la voce d'un oratore situato dal lato opposto. Potranno vedersi ancora a tale proposito le concludenti esperienze del COTTRELL descritte nella nota intitolata: *On the Division of a Sound-Wave by a Layer of Flame or heated Gas into a reflected and a transmitted Wave* inserita nei *Proceedings of the Royal Society* di Londra, vol. XXII, N. 150, pag. 190-191.

(1) *Le Théâtre*, par CHARLES GARNIER. Paris, 1871, pag. 195.

reputiamo degno di nota quanto si legge fra le osservazioni fatte dallo Stratico ad un manoscritto del Landriani, le quali trovansi nel codice altrove citato: « Nel primo capitolo di questo manoscritto tratta l'autore di un articolo spettante ad una parte dell'architettura teatrale, che osservò non essere stato indicato dagli architetti di questo genere di fabbriche. Rimarca egli che si farebbe luogo comodo a molti spettatori per la visuale se si accrescesse lo sfondo dei palchetti che formano il giro semicircolare della curva teatrale. Trasportando, per esempio, a due braccia verso il fondo della platea il centro del semicircolo esteriore dei palchetti si aumenterebbe gradatamente lo sfondo degli stessi dalle estremità laterali del semicircolo verso i palchetti di mezzo e che sono di fronte al proscenio, locchè non farebbe punto alterazione all'aspetto interiore del teatro, darebbe il vantaggio al teatro di potervi collocare seduti bene più spettatori e per quanto egli giudica non farebbe punto danno alla sonorità del teatro, ch'egli pensa essere dipendente dalla forma delle curve comunemente adottate nei moderni teatri — dalla stessa curva non interrotta da risalto alcuno — dal parapetto dei palchi coperto di tavole — dalla vôlta di forma ellittica schiacciata più che si può e di sodo intonaco — dall'imboccatura del proscenio alquanto più stretta verso il palco scenico — e finalmente da una leggiera inclinazione della soffitta del proscenio verso la scena, perchè la voce a guisa di raggi si spanda più facilmente in tutto il teatro ». Osserva pertanto lo Stratico: « Nell'oscurità della teoria fisica nell'argomento della diffusione della voce e de' suoni nei luoghi ampi e chiusi, per la quale è sovente incerto, se i luoghi sieno per riuscire sordi o al contrario circonsonanti e tali che le desinenze delle voci e dei suoni non giungano distinte all'orecchio degli astanti: nella difficoltà di esplorare questi effetti con esperienze concludenti, potrà forse alcuno muovere dubbio se dando alla voce tanto maggior spazio da diffondersi quanto ne risulta dallo sfondo accresciuto dei palchetti, e questo spazio in distanze diverse dalla fronte al fondo dei palchetti, sia per risultare l'uno o l'altro dei difetti suindicati o qualche altro dello stesso genere ».

Per quanto si riferisce alla scena, noi non oseremmo per certo consigliare ai moderni decoratori l'uso delle periacte, che, come vedemmo, il Rhode ed altri vorrebbero applicate anche oggidì: colle esigenze moderne in fatto di decorazione, esse ci sembrano invero poco compatibili; ma è del rimanente sicuro che qualche cosa essi potranno fare onde impedire che tanta parte di suono vada a disperdersi entro le quinte, togliendosi così una tanto grande parte di forza al momento

della emissione. Noteremo così di volo a questo proposito, come, onde diminuire in parte questo grave inconveniente, molte delle principali compagnie di commedia abbiano adottato il sistema della scena chiusa.

Alcuni artifizi sono poi suggeriti onde aumentare la sonorità, sia di un'orchestra, come anche di un ambiente in generale. Si cita infatti l'orchestra del teatro Regio di Torino, la quale andrebbe debitrice delle sue ottime qualità ad una vôlta di forma speciale costruita sotto il piano di essa, vôlta alla cui estremità si trovano due tubi che sboccano sull'orlo anteriore della scena. Si racconta pure che le condizioni del teatro dell'Argentina di Roma, dapprima poco buone ai riguardi acustici, si migliorarono di molto dopochè sotto il suolo del teatro si ebbe occasione di praticare un ampio condotto, che, servendo ad altri scopi, contribuì nel tempo stesso a dare maggiore sonorità alla sala. Questo caso venne diligentemente analizzato dall'Herschel (1), il quale, giovandosi dell'osservazione di fatti consimili, fu indotto a conchiudere che in generale ottime sono le condizioni acustiche degli edifizi situati sopra archi sull'acqua, trovandone la causa nella risonanza del corpo d'aria che sta fra l'acqua e l'arco. A questo proposito noteremo ancora come dalle poche notizie che si hanno intorno al progetto del teatro Massimo di Palermo, pare che in esso l'illustre architetto Basile abbia fatto gran calcolo sopra una ampia camera sonora grande quanto la platea (2). Finalmente registreremo il fatto che in buona parte dei teatri si ha l'abitudine di collocare l'orchestra sopra una specie di cassa a pareti sottili allo scopo di aumentare la risuonanza degli strumenti: intorno a questo proposito non si hanno per verità esperienze decisive, ma tutto porta a credere che tale espediente non torni affatto inutile, come troppo recisamente afferma il Lachez (3).

Anzi, a proposito dell'orchestra, nota il Mariani (4): « Sarà bene praticare sotto di questa la cassa armonica, la quale consiste in un mezzo cilindro di legno collocato in modo che ricorra per tutta la lunghezza dell'orchestra e che rivolga la concavità verso il pavimento

(1) Nella *Encyclopaedia Metropolitana*, all'articolo *Sound*, tomo 25, pag. 752.

(2) *L'Ingegneria Civile e le Arti industriali*. Anno I. Torino, 1875, pag. 30.

(3) *Acoustique et Optique*. Paris, 1848, pag. 28.

(4) *Progetto di un teatro moderno e nozioni generali intorno alla costruzione di questo*, ecc., di Carlo Mariani. Milano, 1846, pag. 44-45.

della sala. Questo mezzo cilindro, secondo il parere di alcuni dotti musici, dev'essere coperto con un graticolato di legno: un tale apparecchio molto contribuisce a produrre buon effetto nella musica ».

Un tentativo di innovazione nel disporre l'orchestra era stato fatto dal Garnier (1), il quale ne abbassò il suolo di 0m,80 sotto la platea col doppio scopo di procurare alle prime file degli spettatori un raggio di luce e di suono non impedito dalle teste dei suonatori e dai manichi degli strumenti, ma di fronte alle proteste dei cosiddetti « professori » d'orchestra, i quali in questo abbassamento vedevano una specie di *diminutio capitis*, un attentato alla loro dignità, dovette rinunziarvi.

E giacchè ci siamo studiati di porgere qui un quadro delle opinioni manifestate da riputatissimi tecnici in una questione tanto controversa, chiediamo il permesso di riprodurre ancora un lungo brano (2) nel quale si contengono notizie ed avvertenze indubbiamente degne di qualche considerazione: notizie ed avvertenze che acquistano tanto maggior valore per il fatto che si riferiscono ad un edifizio di condizioni acustiche bene accertate.

« È manifesto che le anomalie della sonorità dipendono dalla forma, dagli accidenti e dalla struttura delle pareti ripercussive, che la propagazione del suono incontra tanto più di resistenza quanto più si aggrandisce lo spazio, e che dal moltiplicarsi le succedenti onde impulsive dell'aria, attenuandosi le vibrazioni eccitate nelle pareti, riescono meno energiche le sensazioni dell'udito. A perturbare e modificare il suono concorrono il grado di rarefazione dell'aria ambiente, le correnti che se ne generano e gli stessi spettatori. L'acustica ci fa conoscere i vari fenomeni derivanti dai corpi in vibrazione e le leggi che li regolano; ma la sola teorica non basta, nè dà norme positive per operare con sicurezza nella costruzione di una sala, in cui tante cause permanenti ed eventuali hanno influenza sulla sonorità. Bisogna ricorrere alla esperienza, esaminare effetti ottenuti, istituire confronti analogici. Può riguardarsi la sala siccome la cassa d'un grande strumento musicale di percussione od a corda che deve vibrare all'unissono col

---

(1) Leggasi la brillantissima narrazione che di questo suo tentativo fa il Garnier stesso nell'opera *Le Nouvel Opéra de Paris*. Texte. Deuxième fascicule. Paris, 1879. pag. 195-199.

(2) *Il teatro la Fenice di Venezia edificato dall'architetto* Antonio Selva *nel 1792 e ricostruito in parte il 1836 dai fratelli* Tommaso *e* Giambattista Meduna. Venezia, 1849, pag. 34-35.

corpo vibrante, acciò la voce acquisti forza. Per il che parve proficuo rivolgere l'esame anche a tali strumenti, ed ai risultati che se ne ottengono, secondo la loro struttura e la qualità della materia che li costituisce. Si osserva in generale affortificarsi il suono colle superficie concave, come anche colle interne cavità; e le stesse superficie, quando sieno levigate e terse, meglio rispondere che non le scabre. Alle pietre ed ai metalli essere preferibile il legno per la più gradita voce che produce, e meglio secco che fresco od umido; più favorevole se le sue fibre sieno rette ed omogenee, perchè allora l'escursioni delle molecole eccitate si fanno uniformemente. Prolungarsi la durata delle vibrazioni, e riescire più gagliarde se i corpi vibranti sono isolati, e colla maggiore elasticità procedere la maggiore sonorità. In un sistema solido trasmettersi le vibrazioni quando le diverse parti sieno così congiunte che non lascino tra loro alcuna soluzione di continuità, ed, ove questa manchi, turbarsi il tuono. Dietro questi principii si operò nella costruzione del teatro. Per ottenere dalle forme maggiore risonanza si eseguì ellissoideo il cielo della sala, e con interposte curve si tolsero gli angoli rientranti nei palchetti, come intorno al pavimento nello spazio sotto la platea, che ammettesi influire sulla sonorità. Con quelli si accordano le assicelle dei parapetti e delle pareti dei palchetti congiunte esattamente con colla e la tela che in pari modo vi aderisce senza alcuna discontinuazione nè staccamento: così pure tutte le superficie che sono lucide. Allo stesso fine mirò l'architetto Selva allorchè praticò tre cavità nei muri di accerchiamento. Erano state queste proposte anche da altri degli architetti che concorrevano allora pel progetto del teatro, per quanto si ritrae dal parere dei professori Stratico, Castelli e Fontanesi, che ne esaminarono i disegni e i modelli. Le quali cavità in ogni piano, scoperte all'atto della riedificazione, si ridussero a ripostigli per comodo dei palchetti, col ritenere che tuttavia non mancherebbero al primo loro uffizio. Al disotto della orchestra sta la conca armonica. Ne costituiscono la orditura venti centine nella parte semicilindrica, e sei nella mezza calotta alle teste, formate di tavole accoppiate larghe m. 0,24: vi sono confitte le liste di assicelle con due strati di calcestruzzo, al pari del soffitto della sala, il secondo però levigato. La conca non ha altro contatto coi corpi circostanti che quello delle estremità supreme delle centine che s'incastrano nei muri per quanto è necessario a tenerla sospesa: nel palco sovrapposto le travi sono smussate nei loro spigoli, ed il suolo ha tre fori ad intaglio per la migliore propagazione del suono. In ciò consistono le avvertenze praticate in conformità

agli adottati principii acustici per conseguire il possibile migliore risultato, e perchè tutti gli strumenti su di essa disposti ne formino come un solo grande in un corpo isolato vibrante con maggior forza. Meglio sarebbe stato costruire la conca interamente di legname con assicine di abete; ma il dubbio che le varianti condizioni igrometriche ne alterassero la continuità fece dare la preferenza alla stratificazione d'intonaco sopra del contesto ligneo. Una cassa sonora non sarebbe stata nemmeno svantaggiosa sotto a quella parte del palco scenico, che si avanza sul proscenio, dove d'ordinario stanno i cantanti, ma lo impediva l'uso a cui è destinato quel luogo. Tuttavolta per avervi alcun riguardo, si volle costrurvi il pavimento conforme all'altro nello spazio sottoposto all'orchestra ».

Chiuderemo il presente paragrafo relativo ai teatri con alcune notizie intorno al famoso teatro di Bayreuth ed a quello Costanzi di Roma.

Or son pochi anni, quando si costruì a Bayreuth un apposito teatro, a fine di eseguirvi la celebre tetralogia di Wagner, si rivolsero naturalmente tutte le cure ad ottenere che la sala soddisfacesse sotto ogni punto di vista alle esigenze dell'acustica. Quali sieno state le disposizioni particolari adottate dal maestro, che invigilò la costruzione, o, per dir meglio, quali sieno state le sue intenzioni, ignoriamo; poichè anche le persone più competenti e perfettamente al caso di formulare un giudizio ci assicurarono che il segreto più assoluto si mantenne scrupolosamente sulle norme che si credette opportuno di adottare onde raggiungere lo scopo. Novità assolute evidenti però non ve ne sono, ove si eccettui in parte la disposizione data all'orchestra, nella quale si attuarono le tre seguenti innovazioni, delle quali la nostra fig. 28 porge un semplice abbozzo tratto da uno schizzo che ci venne gentilmente comunicato:

Fig. 28.

1° Collocamento dell'orchestra al di sotto della scena in quello che il Wagner chiama col nome di *golfo mistico*, per modo che le prime file dei musicanti rimangono sotto il proscenio propriamente detto;

2° Applicazione di un coperto armonico immediatamente sopra l'orchestra;

3° Raggruppamento particolare dei vari strumenti musicali in tre file parallele. La prima in vicinanza alla scena per gli strumenti di

metallo, la seconda per i bassi di legno, e la terza, cioè la più vicina agli spettatori, per i violini.

Come è noto però, il teatro di Bayreuth (1), non ostante le declamazioni dei fanatici avveniristi, fu giudicato dagli uomini competenti tutt'altro che perfetto ai riguardi acustici, ma in generale nulla possiamo dire, non essendoci note le disposizioni tenute sotto un così geloso secreto, ed anche per quanto si riferisce alla disposizione speciale adottata per la distribuzione degli strumenti nell' orchestra si opina da taluni che essa abbia tratto seco il gravissimo svantaggio di fondere preventivamente i suoni dei singoli strumenti, cancellandone affatto il timbro proprio di ciascuno di essi.

Già prima che a Bayreuth, il Sax aveva proposto di collocare la orchestra dei musicanti sotto il proscenio del teatro ■ di disporre le pareti in modo da aumentare la intensità dei suoni a vantaggio dell'uditorio. E molti anni prima scriveva a tale proposito lo Stratico già citato: « Il pensiero di tenere il piano dell'orchestra così basso che i corpi dei suonatori e degl'istromenti non interrompano la vista degli spettatori sedenti nella platea ha potuto eseguirsi nel teatro dell'*Hermitage* costruito dal Quarenghi in Russia per quella Imperial Corte, ma non potrebbe aver luogo ne' nostri teatri: poichè pretendono i suonatori, e molti ancora oltr'essi, che resterebbe come sepolta l'armonia dell'orchestra, nè riuscirebbe tanto comoda ai cantanti ».

Nel nuovo teatro Costanzi di Roma poi, il piano della orchestra venne composto di cinque piani inclinati che s'inoltrano in discesa per tutta la profondità del proscenio, dentro una specie di mezza curva foggiata a paraboloide ellittico e costruita con legno sottilissimo e bene stagionato. Intorno agli effetti di questa nuova disposizione non crediamo sufficienti le esperienze finora eseguite, perchè sia permesso di pronunziarsi in modo assoluto e decisivo sulla sua effettiva opportunità. Al momento in cui scriviamo non si è eseguita in questo nuovo teatro che una sola opera in musica, cioè la *Semiramide*, eseguita per di più da una orchestra molto limitata: in tale circostanza si notò che la fusione dei suoni è perfetta, anzi, per orchestrazioni fatte senza ricerca di coloriti orchestrali, è eccessiva, ciocchè porgerebbe argomento a ritenerla di miglior effetto con musiche moderne;

---

(1) Leggiamo nei giornali che in questo edifizio si stanno attualmente introducendo notevoli modificazioni architettoniche, per la prossima rappresentazione della nuova opera *Parcival* del maestro WAGNER.

l'orchestra apparirebbe meno brillante, ma più dolce. L'effetto di consonanza continuo che ne viene è tale, da generare noia nelle opere povere di strumentazioni; lascia però scoperte le voci, e questo è un vantaggio.

La conclusione ultima converrà attenderla da nuove esperienze, colla fiducia che esse riescano a far adottare un sistema, che permette di aumentare notevolmente la illusione scenica. Riesce infatti piacevolissimo e drammaticamente efficace il trovarsi in rapporto immediato coll'attore, senza che la vista di lumi, leggii, strumenti, braccia in movimento, gote enfiate vi richiamino continuamente alla realtà della vostra posizione di spettatore di un'azione teatrale.

§ III.

Aule parlamentari.

Se noi ci facciamo ad esaminare le sale che in diverse epoche e presso diversi popoli si vennero allestendo per raccogliervi i rappresentanti della nazione, ci è d'uopo conchiudere che in generale nessun dato scientifico ha presieduto alle diverse disposizioni adottate, oppure che, se effettivamente si ebbe ricorso alla applicazione di una qualche norma direttiva ai riguardi della acustica, non si seppe, in ultima analisi, trarne che ben poco profitto. Nello studio delle piante si passa dal quadrato al semi-cerchio ■ dal semi-cerchio al quadrato: si varia dal quadrato al rettangolo, dal semi-cerchio semplice al semi-cerchio che si raccorda con un rettangolo, si danno all'insieme dei seggi le forme più o meno pronunziate del ferro da cavallo, si abbandonano ■ si ritorna a queste forme diverse alternativamente, senza alcuna ragione scientifica, per puro capriccio, a seconda che un quadrato od un semi-cerchio si adatta meglio alla disposizione generale di una pianta. Tutti questi cambiamenti non sono già tentativi fatti allo scopo di soddisfare alle esigenze dell'ottica e dell'acustica: l'andamento delle ondulazioni ■ delle riflessioni sonore, la facile visibilità degli oggetti non esercitarono pressochè mai influenza alcuna sulla forma adottata per le aule destinate alle discussioni dei corpi legislativi.

Vi fu anzi, or sono cinquant'anni, una occasione nella quale sembrava che la scienza e l'arte fossero accordate per concorrere alla e-

dificazione d'una sala monumentale, che soddisfacesse pienamente alle legittime esigenze dell'acustica e dell'ottica, ma non se ne fece nulla (1). Ciò avvenne in Francia, dove una commissione scientifica composta di membri dell'Istituto, aveva espresso il voto che la Camera dei Deputati venisse coperta con un soffitto, ma l'arte e le sue tradizioni chiedevano imperiosamente una vôlta; l'arte non si preoccupava degli effetti nocivi che avrebbero immancabilmente prodotto delle pareti a superficie curve a motivo degli echi più o meno sensibili cagionati dalla concentrazione delle onde riflesse in certi punti, e sopratutto una troppo grande massa d'aria male distribuita. L'arte e la scienza si trovavano dunque in opposizione manifesta, ma, come del resto era da attendersi, le esigenze artistiche ebbero il sopravvento, ed anche questa volta l'acustica rimase sagrificata.

Uno dei problemi di più difficile soluzione, fra quanti si affacciano nella gravissima questione dell'acustica applicata alle costruzioni, è indubbiamente quello di edificare una sala per un corpo legislativo; e con altrettanta certezza può asserirsi che in nessun caso, come in questo, di un ambiente, nel quale si agitano alle volte i destini delle nazioni, è imperiosamente richiesto che le condizioni acustiche sieno superiori a qualunque eccezione. Non solo è necessario che la voce degli oratori sia udita da tutti gli astanti, ma è altresì mestieri che le voci più esili possano essere distintamente percepite, senza sforzi, i quali non permetterebbero lunghe concioni e senza che la tensione dell'organo vocale di chi parla, comunicandosi all'anima, porti alla declamazione, tanto pericolosa, in una discussione politica (2).

Un'aula parlamentare non è un semplice teatro dove l'uditorio possa essere ammonticchiato secondo il capriccio di un impresario. I membri della Camera devono essere assisi comodamente con una scrivania innanzi ad ognuno di essi: e di più, permettendo una circolazione fa-

---

(1) Una narrazione, anche soverchiamente particolareggiata delle discussioni e perfino dei pettegolezzi ai quali diede occasione questo progetto, si trova nella seconda edizione dell'opera del LACHEZ più volte citata, pag. 235-413.

(2) Raccomando all'attenzione del lettore questo passo dell'opera del TAINE, intitolata: *Les origines de la France contemporaine. La Révolution*, tome I. Paris, 1878, pag. 144, relativo all'Assemblea Costituente di Francia: « A Versailles, puis à Paris, ils siègent dans une salle immense, capable de tenir deux mille personnes, où, pour se faire entendre, la plus forte voix doit se forcer. Point de place ici pour le ton mesuré qui convient à la discussion des affaires; il faut crier, et la tension de l'organe se communique à l'âme: le lieu porte à la declamation! ».

cile e comoda tra fila e fila di sedili. Di qui la ineluttabile necessità di una superficie maggiore per raccogliere un uditorio di simil genere che non in qualsiasi altro caso. Negli anfiteatri ordinari aventi per iscopo il pubblico insegnamento, si possono collocare tre uditori per metro quadrato; in un'aula parlamentare, dove talvolta devono raccogliersi cinquecento e più deputati non se ne può collocare che due ogni tre metri quadrati, e nel rapporto della superficie generale non si può oltrepassare la cifra di un metro per individuo senza gravi inconvenienti.

La voce, o per dir più esatto, la parola, lo abbiamo ripetutamente affermato, per essere bene intesa deve essere chiara, netta, e giungere all'orecchio dell'uditorio completamente spoglia di qualsiasi accompagnamento acustico. L'organo vocale avendo d'altronde una potenza d'intonazione più o meno limitata, ma sempre compresa entro certi confini, esigui comparativamente agli strumenti musicali, la cui intensità può essere relativamente immensa, la potenza vocale non deve spendersi che in uno spazio ristretto se si vuole ottenere un risultato utile (1), cioè senza fatica per parte dell'oratore, senza tensione per parte dell'uditorio.

Il difetto capitale delle grandi aule è la soverchia sonorità, le masse d'aria vi sono troppo grandi, mal disposte e sopraeccitate da tutte le pareti riflettenti. L'aria scossa dalla parola diventa così uno strumento acustico, che accompagna in modo più o meno rumoroso, ma sempre sfavorevole, la parola. È mestieri inoltre saper utilizzare i fenomeni di riflessione e di assorbimento delle onde sonore in modo da rinforzare la intonazione vocale e combattere la sonorità.

Ecco pertanto, secondo questi concetti, quale sarebbe la disposizione che meglio converrebbe di dare ad un'aula per lavori parlamentari, affinchè essa si trovi in buone condizioni ottiche ed acustiche (2). Per fissare le idee noi supporremo che l'abitudine porti che gli ora-

---

(1) Nella sala provvisoria ad uso dell'Assemblea Costituente di Francia convocata nel 1848, si giunse persino a collocare taluni uditori alla distanza di 45 metri dalla tribuna, obbligando l'oratore a far vibrare coi suoi polmoni un volume d'aria di ben 18,000 metri cubi!

(2) Seguiamo qui la esposizione del LACHEZ più volte citato, come già altrove abbiamo avvertito, aggiungendo espressamente che le due figure da noi schematicamente riprodotte sono dedotte da quelle relative ad un progetto da lui redatto per un'aula destinata ad una assemblea costituente composta di novecento membri.

tori parlino da una tribuna: ben sappiamo che in taluni paesi vige l'uso che ogni oratore parli dal suo posto, ma d'altra parte è questa una abitudine la quale, indipendentemente da altre circostanze che la rendono inopportuna, dovrà essere sagrificata alle troppo giuste esigenze della scienza. È mestieri o non imporre condizioni le quali rendano insolubile il problema, o rassegnarsi al gravissimo sconcio di vedere che ogniqualvolta parla un oratore influente o di vaglia, quelli che lo vogliono sentir bene abbandonano il loro posto e si aggruppano intorno a lui, come accade quotidianamente nell'aula di Montecitorio a Roma.

Siccome pertanto noi non intendiamo di dare un vero e formale progetto, così ci asterremo dall'accompagnare la nostra esposizione

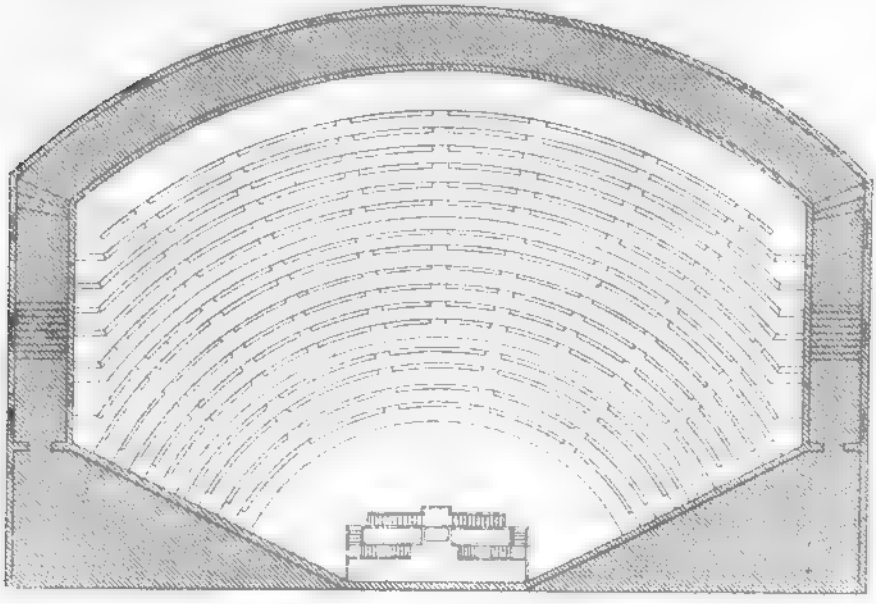


Fig. 29.

con figure particolareggiate, le quali richiederebbero d'altra parte che si entrasse in molte altre questioni qui assolutamente fuori di luogo, e ci contenteremo semplicemente di due figure schematiche, le quali valgano a rappresentare la pianta ed una sezione dell'aula alla quale ci andiamo riferendo (fig. 29 e 30).

L'uditorio dovrebbe trovar posto sopra gradinate parallele e circolari che non si sviluppino che sopra un terzo od un quarto di cerchio. Le gradinate dovrebbero essere naturalmente disposte secondo una

curva isacustica; tutte le posizioni dell'uditorio verrebbero a convergere verso un centro unico, la tribuna e la presidenza, e ciascun posto si troverebbe in tale relazione rispetto al centro fonico, da permettere ad ognuno di veder sempre in faccia l'oratore, che allora viene inteso nel modo più diretto e più favorevole; non vi sarebbe così alcun posto obliquo, od almeno l'obliquità sarebbe così poco sensibile sui fianchi da essere riguardata come nulla o di nessun effetto.

In luogo di un muro piano e continuo nel fondo della sala, al di dietro del seggio presidenziale, partono due muri obliqui, i quali si stendono da ogni estremità del tratto di muro piano che sta dietro al seggio medesimo; per tal modo sono soppressi, a vantaggio della massa generale, gli spazi laterali dove la voce si sente con difficoltà e di dove non si ha una vista perfetta della tribuna, dove infine si

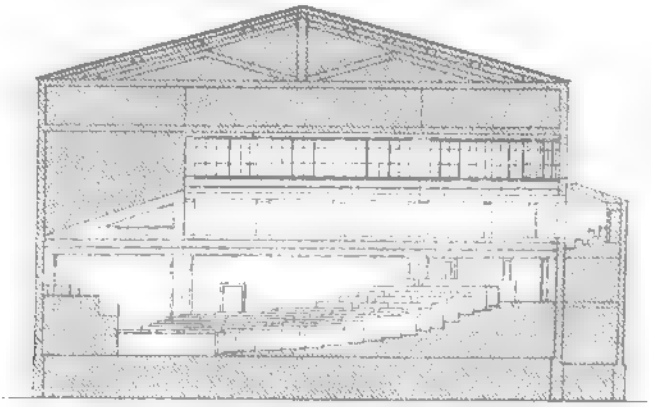


Fig. 30.

trovano ordinariamente corpi d'aria inutili o nocivi. L'altezza della sala poi non dovrebbe oltrepassare tutto al più i 15 metri. Così la tribuna come il banco presidenziale dovrebbero essere abbastanza elevati perchè tanto l'oratore quanto il presidente possano, per così dire, dominare l'uditorio; allo scopo poi di rinforzare maggiormente la voce degli oratori e riversarla in certo qual modo sulla massa degli uditori, il soffitto dovrebbe per buon tratto essere inclinato, come è indicato nella nostra fig. 30, in modo da ottenere la riflessione più sollecita, più perfetta, in una parola, più utile.

Anche in questo caso adunque noi facciamo consistere la soluzione del problema principalmente nel rinforzare le onde dirette di suono nel luogo stesso di emissione.

La forma testè descritta e che le figure, per quanto schematiche, bastano tuttavia a mettere in evidenza, si avvicina per così dire a quella di un padiglione acustico, dove il centro fonico occupa la parte più esigua dello strumento per estendersi poi naturalmente verso la parte più ampia. Una tale disposizione è perfettamente l'opposto di quella generalmente adottata nella costruzione delle grandi aule parlamentari. Si lamentano i gravissimi inconvenienti che conseguono dal non sapere o dal non volere applicare quelle norme che la scienza suggerisce, ma non si pensa a recarvi rimedio: ed in una recentissima occasione, mettendosi a concorso il progetto per la nuova aula ad uso della Camera dei Deputati a Roma, si eccitò la ilarità degli ingegneri italiani e stranieri ponendo fra le condizioni questa che riportiamo testualmente (1): « Nello studio delle disposizioni interne dell'aula, della sua forma e della sua decorazione converrà avere grande riguardo alle condizioni acustiche della sala, ed evitare così i risalti, gli spigoli salienti o rientranti e quant'altro può contribuire alla rifrazione *(sic!)* od al disperdimento della voce degli oratori ».

Ritornando pertanto ai criteri suesposti, aggiungiamo che noi abbiamo voluto limitarci ad un semplice cenno, perchè non ci pare che questo sia il luogo di dare un progetto particolareggiato; ma ad ogni modo ci sembra che quel poco che ne abbiamo detto basti a far comprendere come la proposta disposizione si presterebbe a soddisfare alle esigenze acustiche assai meglio che non si ottenga seguendo i capricci artistici degli architetti, i quali finora poco o nulla si preoccuparono del lato scientifico che il problema presentava nella sua soluzione.

§ IV.

Anfiteatri per il pubblico insegnamento.

Gli anfiteatri di tal genere essendo ordinariamente destinati a farvi intendere la parola degli oratori e dei professori, deve cercarsi nella costruzione di queste sale tutto ciò che può render facile, chiara e potente la voce. La forma deve essere in armonia colle ondulazioni

(1) Veggasi il programma di concorso pubblicato colla data 27 luglio 1879 nella *Gazzetta Ufficiale del Regno d'Italia*, e riprodotto anche da altri periodici. La condizione alla quale si accenna qui è registrata nel programma alla lettera *f*.

che vi si eccitano. Se adunque si consideri in qual modo si propagano le onde sonore eccitate dalla parola, la loro intensità particolare nel senso verso il quale l'oratore manda per così dire la sua voce, ben si scorge come la forma più opportuna di un ambiente a tale scopo destinato debba assumere la forma triangolare, p. e., quella che si ottiene mercè la costruzione seguente (fig. 31): si assuma un semi-cerchio e lo si divida in tre parti disuguali, mercè due rette a 45° che partono dal centro e si tagliano ad angolo retto; infatti tutti i posti situati nel settore di mezzo sono preferibili a quelli collocati sui fianchi, ed anche prima di raggiungere il diametro del semi-cerchio, la posizione diventa talmente incomoda, che in quegli anfiteatri i quali presentano una forma esattamente od approssimativamente semicircolare, gli spazi al di qua delle linee a 45° non sono occupati se non nel caso in cui non sia possibile di trovar posto altrove.

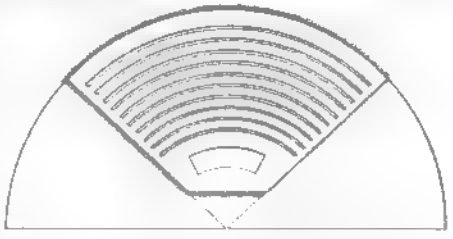


Fig. 31.

Se ora noi portiamo la nostra attenzione sul modo nel quale si riflettono i suoni, torna agevole il dedurre la forma più conveniente e meglio appropriata a questo genere di riflessioni. Infatti noi sappiamo che la parabola manda parallelamente al suo asse tutti i raggi sonori che hanno il fuoco della curva per centro fonico; la forma degli anfiteatri dovrebbe adunque essere parabolica e l'insieme delle sue pareti e del soffitto avvicinarsi nel maggior modo possibile ad un paraboloide.

Sembra inoltre che in pianta la parabola dovrebbe essere scelta per modo che le tangenti ai suoi estremi si tagliassero ad angolo retto, o che almeno gioverebbe non allontanarsi che pochissimo dall'angolo di 90° per evitare le posizioni oblique degli uditori rapporto al professore. Tuttavia allorquando la sala raggiunga certe dimensioni è bene che le sue linee oblique, le quali limitano i fianchi dell'anfiteatro, divengano parallele prolungandosi più o meno a seconda dei casi in tale direzione fino al fondo della sala, e ciò allo scopo di tenere maggiormente raggruppato l'uditorio e di occupare una superficie relativamente meno estesa.

Ed allorquando la sala raggiunga proporzioni considerevoli tornerà opportuno partire da un angolo maggiore di un retto per ravvicinare

la massa degli uditori alla parte centrale. Si scorge adunque esistere una differenza radicale fra la forma più razionale e quella che si ha l'abitudine di dare agli anfiteatri, i quali per la massima parte sono semi-circolari: il miglior modo di utilizzare questi ambienti sarebbe, secondo l'avviso di tecnici competentissimi, di invertire perfettamente le posizioni occupate dall'oratore e dal pubblico, collocando l'uditorio dalla parte del diametro e chi parla sulla circonferenza o verso l'estremità del raggio perpendicolare al diametro. Poichè ordinariamente l'oratore è collocato nella parte più ampia della sala quando invece ne dovrebbe occupare la più ristretta allo scopo di rimandare le ondulazioni sonore in uno spazio utilmente occupato dalle persone che devono intenderlo e non in uno spazio dove tali ondulazioni andrebbero perdute, quando pure non divenissero nocive a motivo delle particolari risuonanze che eventualmente possono determinare.

Nulla aggiungeremo intorno alla più opportuna disposizione dell'uditorio, avendo già avuto occasione di trattare con ogni particolare questo argomento nella seconda parte del presente lavoro. Qui ripeteremo soltanto che nello stabilire i vari elementi dai quali dipende la forma della curva isacustica dovrà aversi riguardo specialissimo alla destinazione dell'anfiteatro, e ciò per le ragioni altrove addotte.

Disposti pertanto gli uditori nel modo già specificato, se si copre l'anfiteatro con un piano orizzontale, si avrà al di sopra di chi parla uno spazio considerevole che presenta un cubo d'aria nocivo alla percettibilità dei suoni, nel senso che non solo esso deve essere scosso dalla voce come il rimanente della massa d'aria, ma altresì perchè esso dà sovente origine a nuove ondulazioni, le quali producono una sonorità che deve essere con ogni studio evitata. Per ovviare a questo inconveniente quindi tornerebbe opportuno di inclinare il soffitto degli anfiteatri dalla parte del professore e nel senso istesso della inclinazione sulla quale trovasi collocato l'uditorio.

Inoltre per ciò che riguarda i grandi anfiteatri notiamo che tornerebbe opportuno di rivestire le pareti di fondo con panneggiamenti assorbenti il suono e ciò allo scopo di evitare una riflessione, la quale se non costituisce un inconveniente per gli uditori i quali occupano le ultime file, lo è invece per quelli che si trovano nelle prime, e ciò perchè passerebbe un tempo sensibile fra la percezione dell'onda di suono diretta e quella riflessa, ingenerando non lieve confusione.

Prima di abbandonare questo argomento vogliamo notare come alla forma più opportuna da noi stabilita *a priori*, possa pervenirsi anche *a posteriori*, osservando cioè come vadano gradatamente ad essere oc-

cupati i vari posti di un anfiteatro, nel quale ognuno possa prendere posto a piacimento e nello sceglierlo non abbia altro scopo che quello di ben vedere e di ben udire. È questa una osservazione che abbiamo fatta più volte e che ha sempre dato i medesimi risultati. Tutti i seggi in faccia all'oratore, anche se relativamente distanti, sono occupati per i primi e soltanto dopo, quelli laterali.

In tale circostanza sarebbe adunque suggerito di tagliar fuori lo spazio a fianco dell'oratore, aumentando in profondità le proporzioni dell'ambiente, a fine di guadagnare lo spazio che per tal modo viene a perdersi. La forma, alla quale per tal modo si perviene, è precisamente quella alla quale si è accennato, ed essa combina i vantaggi della riduzione dello spazio in vicinanza all'oratore, insieme con quelli che derivar possono dal circondarlo di superficie favorevoli alla riflessione e probabilmente anche in circostanze di favorevole condotta.

Onde togliere equivoci crediamo opportuno di avvertire che i suggerimenti che siamo venuti esponendo si riferiscono ad anfiteatri nei quali si devono raccogliere almeno due o più centinaia di uditori; per piccoli anfiteatri od in condizioni particolari, come sarebbero per modo di esempio quelle per le quali gli astanti devono poter leggere a rovescio sopra una lavagna orizzontale, attesa la piccolezza dell'ambiente, non sarà d'uopo in generale preoccuparsi seriamente della questione acustica, la quale, nella maggior parte dei casi, si troverà risolta adottando la disposizione dei sedili conformemente alle regole altrove da noi esposte.

Nel caso però in cui sia, per qualche speciale motivo, desiderabile che l'uditorio si estenda fino ad occupare anche i fianchi della cattedra o della tribuna, vogliamo indicare come tipo l'anfiteatro che era stato costruito da Wren istesso per la scuola di medicina di Londra — diciamo era stato, perchè attualmente più non esiste nella sua integrità — ■ del quale si ha una assai accurata descrizione del prof. Cockerell, inserita nella biografia di Wren, stesa da Elmes. Notevolissimo poi, secondo il tipo istesso, è l'anfiteatro della Royal Institution di Londra, il quale, quando si presentino le suaccennate circostanze, merita di essere proposto come modello. Nella occasione dell'inchiesta praticata quando si trattò di ricostruire l'aula del parlamento inglese, inchiesta alla quale abbiamo già incidentalmente accennato, Faraday dichiarò che questo anfiteatro, nel quale potevano star sedute 800 persone, era da lui considerato quasi come perfetto per un solo oratore. Esso è inoltre additato come esempio dal celebre architetto Scott Russell. Architetto di tale anfiteatro fu

il Webster, ed è fama che egli siasi giovato, in tale occasione, dei consigli di Rumford e di Humphry Davy. Ho creduto opportuno di riprodurre i disegni della pianta e della sezione (fig. 32 e 33), sui quali, volendo noi indagare le cause di così eccellenti condizioni acustiche, scorgiamo anzitutto che le principali dimensioni hanno il rapporto assai semplice tra loro di 2, 3 e 4, l'altezza, la lunghezza e la larghezza essendo rispettivamente, colla differenza di pochi pollici, 30, 45 e 60 piedi. Inoltre gli uditori si trovano assai vicini all'oratore, e, per la poca distanza fra fila e fila, il volume d'aria contenuto nell' ambiente è ridotto ad un minimo, e quindi il minimo di voce va disperso. In terzo luogo i sedili si elevano secondo una curva simile a quella proposta dallo Scott Russell

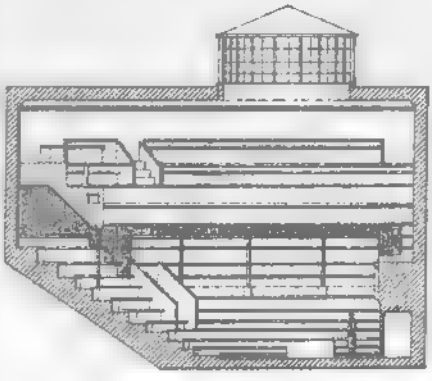


Fig. 32.

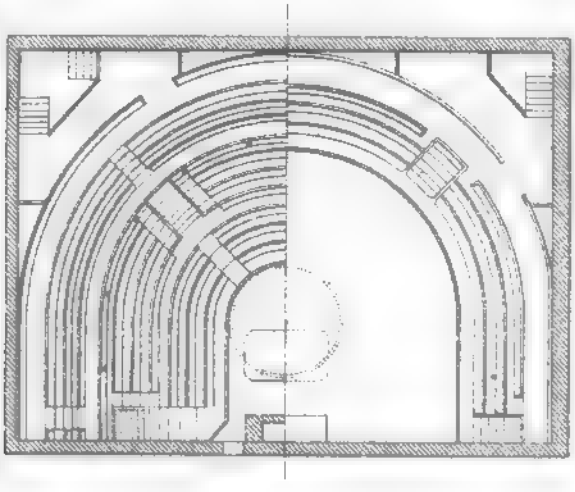


Fig. 33.

n questa circostanza, insieme con quella delle moderate proporzioni dell'ambiente, assicura ad ogni uditore un raggio sonoro diretto ad una linea visuale ininterrotta.

Per essere tutta la costruzione in materiale risuonante, tutta la tratta semicircolare essendo in legno, ed inoltre trovandosi sotto il pavimento dei vuoti considerevoli, l'ambiente ha una sonorità alquanto eccessiva quando è vuoto, ma quando è occupato dall'uditorio la risonanza è ridotta entro i dovuti limiti, perchè non riesca nociva.

Il solo particolare, il quale, a giudicarne *a priori*, farebbe nutrire un qualche sospetto sulla perfezione acustica di questo anfiteatro, riguarda la lanterna e la sua forma; ma, ben riflettendo alla sua sezione circolare, si comprende che è evitata la risonanza di un forte volume cubico d'aria, per cui, ad ogni modo, gli eventuali effetti di eco dovrebbero essere evitati. Infatti, collocandosi al disotto della lanterna ed occupandone la posizione centrale, di fronte all'oratore è percettibile un debole eco, che però non si sente più nella posizione nella quale l'oratore stesso deve trovarsi e che è indicata nella fig. 32.

§ V.

Corti d'Assise.

Il numero delle persone che in una Corte d'Assise devono poter udire distintamente non è molto grande, e d'ordinario anche esse trovansi raggruppate in uno spazio piuttosto ristretto, ma per queste, vale a dire, giudici, imputati, giurati, pubblico ministero, avvocati, testimoni, periti e stenografi, sono richieste condizioni perfette di audizione.

E, per verità, non sarebbe troppo il chiedere all'architetto che, per queste poche persone, le quali occupano relativamente così piccolo spazio, fosse provveduto in modo soddisfacente alle esigenze dell'acustica.

La principale difficoltà da superarsi sembra essere offerta dal fatto che le udienze delle Corti d'Assise sono d'ordinario assai affollate e, per conseguenza, riesce nel complesso assai notevole la superficie che smorza il suono, mentre, d'altra parte ancora, la necessità di provvedere ad una larga quantità di aria senza l'impiego di speciali apparecchi di ventilazione, fa desiderare che il locale abbia in altezza dimensioni piuttosto considerevoli. Queste adunque sono le difficoltà a superarsi, per fermo, non insormontabili; ma ci si dica, quanti architetti, incaricati di costruire una sala ad uso d'una Corte di Assise, presero a considerare anche in via accessoria la questione

acustica, ■ dimostrarono di essersene in qualche modo preoccupati? Certamente assai pochi, onde non è meraviglia se le sale a tale scopo destinate che noi abbiamo avuto occasione di visitare in Italia, si trovino in condizioni acustiche deplorevolissime.

Qui il problema ha duplice aspetto: è mestieri che il personale summenzionato oda perfettamente tutto quanto interessa il dibattimento, per quanto sia esile la voce di chi parla; inoltre la pubblicità data alle udienze richiede che anche il pubblico possa udire in modo sufficientemente distinto — in secondo luogo sarebbe desiderabile che gli eventuali rumori prodotti nell'uditorio, i bisbigli, i calpestii prodotti dall'andirivieni della folla, fossero smorzati per quanto è possibile, affinchè non si turbino le condizioni acustiche che, con ispeciali provvedimenti, si saranno assicurate anzitutto al personale direttamente interessato al dibattimento, e, secondariamente, al pubblico.

Per assicurare queste buone condizioni converrà anzitutto ridurre, per quanto è possibile, lo spazio al di dietro ed al di sopra della Corte, in modo che il personale superiormente enumerato venga a trovarsi come in una specie di recesso. L'uditorio può essere collocato in posizione più elevata e dovrà essere disposto ad anfiteatro, che termini con una parete a pianta curvilinea.

Per ismorzare i rumori che eventualmente possono prodursi nel pubblico, sarà opportuno coprire il pavimento di stuoie e non di tavolato, come talvolta si vede, in opposizione ai principii più rudimentali di acustica, oppure si potrà anche, come si usa in Inghilterra, coprirlo di caoutchouc. Sarà inoltre opportuno di evitare nella decorazione gli angoli salienti in generale, e se, come talfiata avviene, si aggiunge una galleria per i posti distinti o riservati, converrà che questa abbia il minore aggetto possibile, evitando inoltre le decorazioni soverchiamente sporgenti.

Inoltre dovranno evitarsi cortinaggi e tappeti in vicinanza al posto occupato dalla Corte, mentre invece tornerà utile e talvolta necessario lo stendere dei cortinaggi dietro all'uditorio, onde impedire la formazione dell'eco, il quale tornerebbe di maggiore incomodo alle persone più distanti dalla parete su cui si produce, cioè precisamente a quelle alle quali interessa di procurare migliori condizioni di audizione. A questo medesimo scopo si potrà pure far cospirare la decorazione architettonica, aggiungendo nicchie, pilastri, colonne, che infrangano l'onda sonora, dopochè essa ha prodotto il suo effetto sull'uditorio.

CAPITOLO II.

EDIFIZI NEI QUALI IL SUONO VIENE DIRETTO O CONDOTTO.

§ I.

Chiese.

Ed ora passiamo ad esaminare la seconda categoria di edifizi, nei quali il suono, che naturalmente si propaga, viene coadiuvato da quello diretto o condotto lungo muraglie e soffitti, e preservato mediante essi da dispersione laterale.

A questa seconda categoria appartengono gli edifizi destinati al culto religioso ai quali, nei riguardi esclusivamente acustici, sarebbe opportuno di dare disposizioni analoghe a quelle che abbiamo testè suggerito per le corti di giustizia: e tali infatti erano adottate nelle prime basiliche, che, fin dall'epoca di Costantino, vennero trasformate da corti di giustizia e da luoghi di convegno per transazioni commerciali, in locali per raccogliervi i cristiani nell'esercizio del loro culto.

Queste basiliche, lo ripetiamo, avevano una disposizione perfettamente analoga a quella che abbiamo testè esposta come un *desideratum*, tenendo parola delle moderne corti d'assise: vale a dire un ampio sfondo, che nelle chiese moderne divenne la località serbata al santuario, o, come si direbbe nelle chiese cattoliche, all'altar maggiore, sfondo il quale aveva pianta semi-circolare. La parte principale dell'edifizio poi era di semplice disegno, oblunga, divisa da due file di colonne in una navata principale e due laterali: sulle colonne si impostavano delle arcate che sostenevano un tetto principale di legno, il quale ricopriva la navata; e due tetti inclinati, che si appoggiavano contro i muri elevati sulle arcate lanciate da colonna a

colonna, ricoprivano le navate laterali. L'intero edifizio era illuminato mediante una serie di finestre sopra gli archi della navata.

Fra le basiliche romane sonvene talune di così smisurata lunghezza, che nessuna voce, per quanto potente, potrebbe farvisi udire in ogni punto, ed assai probabilmente non era nelle intenzioni di quegli architetti che così immensi ambienti fossero interamente occupati da persone, le quali dovessero raccogliervisi per udire la voce di un oratore; ma ad ogni modo, la forma ne è evidentemente atta ad impedire che il suono si disperda, ed a dirigerlo nel senso della lunghezza, e per raggiungere tale scopo erano senza dubbio molto più appropriate quelle disposizioni che non quelle altre adottate dai più arditi costruttori del medio evo.

Prima di addentrarci maggiormente nelle discussioni relative ai requisiti che devono offrire i locali destinati al culto religioso, secondo le odierne esigenze, sarà opportuno il porre in evidenza in che consimili costruzioni differiscano essenzialmente da quelle aventi per iscopo divertimenti pubblici, od istruzione, delle quali abbiamo finora avuto motivo di occuparci.

In un teatro, una circostanza alla quale si deve avere uno speciale riguardo si è quella che, non solo il pubblico possa vedere ed udire quanto si fa e si dice o si canta sul palcoscenico, ma ancora che gli spettatori possano vedersi fra di loro, poichè questa è parte non ultima dei divertimenti teatrali.

In una sala di letture scientifiche o letterarie, il soddisfare o meno a questo requisito è affatto indifferente. Inoltre in un teatro è mestieri che le cose sieno disposte per modo da adattarsi a tutte le fortune e da appagare il lusso ed il fasto, d'onde nasce il bisogno di posti di genere diverso, anzi di varie categorie di posti più o meno cospicui, come del resto può essere fatto senza pregiudizio anche in una corte d'assise, od in una sala di letture.

In un locale destinato al culto, per lo contrario, nè l'una nè l'altra di queste circostanze deve presentarsi: infatti è desiderabile che tutto favorisca il massimo raccoglimento: che gli astanti non abbiano distrazioni nella preghiera, e quindi possano vedere il meno possibile il rimanente del pubblico divoto; sarebbe inoltre assolutamente contrario alla legge di uguaglianza degli uomini in faccia a Colui al quale rivolgono le loro preci, lo stabilire posti distinti o separazioni troppo marcate fra le varie classi sociali. Per conseguenza tutto ciò che può contribuire a far raggiungere quei due scopi, che per un luogo di pubblico trattenimento sono essenziali, deve essere assolutamente la-

sciato da parte per una chiesa: quindi la necessità di distribuire da un lato il pubblico sopra un piano orizzontale, di escludere dall'altro la forma circolare o qualsivoglia altra analoga.

Nelle moderne chiese protestanti è nello stesso tempo indispensabile che chiunque degli astanti possa facilmente udire la voce d'una persona che parla o che legge, e che possano inoltre tutti i presenti rivolgere i loro sguardi in una medesima direzione. Naturalmente la miglior forma da darsi alla pianta di un edifizio di tal genere sarebbe quella di un rettangolo assai allungato, e poichè d'ordinario il punto di mira si trova ad una certa elevazione dal suolo, l'uditorio potrà essere tutto sopra un piano orizzontale e coi sedili disposti in modo da far mirare a chi li occupa verso uno dei lati minori del rettangolo medesimo.

Nel caso in cui fosse assolutamente necessario aumentare il numero dei posti disponibili, potrà, con non gravi inconvenienti, aggiungersi una galleria o loggia ad una estremità della chiesa, in modo che quelli che la occupano abbiano la visuale diretta nel medesimo senso degli altri, quantunque la divisione dei devoti e la distribuzione di posti, in certo qual modo distinti, debba, per quanto è possibile, sempre evitarsi. In talune chiese trovansi pure delle gallerie laterali, ma contro queste possono sollevarsi ambedue le accennate obbiezioni, quando però, come avviene nelle sinagoghe, non sieno richieste dalle consuetudini del culto che si professa.

Proponiamoci ora di considerare in particolar modo chiese e cappelle costruite con una navata principale e due laterali, secondo il tipo più comune. Ammesso che la forma oblunga sia, sovra tutte le altre, desiderabile in edifizi eretti a scopo di culto, vi sono varie ragioni, le quali militano, oltre a quelle dell'antico uso, in favore di tale disposizione. Non ultima fra queste è che, quand'anche l'edifizio abbia pianta quasi quadrata e sia tutto l'uditorio da disporsi sopra un piano orizzontale, esso guadagna nell'aspetto, e fino ad un certo punto, anche nelle condizioni acustiche, mercè la introduzione delle colonne, quantunque in cosiffatte circostanze non debba ammettersi che una grandissima influenza venga esercitata sul suono, nel senso di dirigerlo e di preservarlo dalla dispersione, come invece sembra avvenire in edifizi nei quali la lunghezza predomina d'assai, in confronto della larghezza.

Nelle grandi chiese medio-evali si troverà sempre la vôlta troppo elevata, perchè su di essa possa contarsi per la inalterata trasmissione dei suoni.

Lo scopo a cui si mirava nella erezione di consimili moli non era quello di avere un edifizio nel quale potesse udirsi la voce d'un oratore, ma di elevare un monumento per le grandi cerimonie religiose, e non si badava affatto a che la risonanza della massa d'aria ivi contenuta fosse più o meno grande, almeno fintantochè essa non riuscisse a guastare gli effetti della musica. Ed infatti la sonorità della maggior parte delle grandi chiese oppone un gravissimo ostacolo al servirsene utilmente per lo scopo della predicazione.

La disposizione generalmente adottata a quest'uopo è senza dubbio la migliore: un pergamo appoggiato ad un pilastro o ad una colonna della navata principale, coperto da un ampio riflettore, mentre i devoti possono liberamente prendere posto di fronte, ai lati, e persino di dietro, aggruppandosi intorno all'oratore. L'aiuto diretto che la voce può trovare nell'edifizio stesso non sarà in generale notevole, ma un abile oratore saprà trar profitto dalla risonanza dell'ambiente, mentre uno inabile non vi troverà che una causa di confusione, e la tranquillità dell'ambiente e le sue grandi proporzioni potranno anche fino ad un certo punto essere utilizzate. Stando nel coro è spesso difficile distinguere le parole pronunziate da un oratore o da un lettore che si trovi sul pergamo, ma cionondimeno deesi ammirare la bellezza che la estrema sonorità del luogo bene spesso impartisce a qualsiasi suono musicale ivi prodotto.

Tornando alle chiese di dimensioni ordinarie e della forma generalmente adottata, è interessante quanto scrive a questo proposito il Denison nelle sue *Lectures on Church Building*: « Si è recentemente scoperto che per quanto i pilastri o le colonne, le navate laterali ed i soffitti discontinui delle chiese gotiche fabbricate sul modello delle antiche non costituiscano circostanze favorevoli ad una buona audizione, pure in generale esse si trovano in condizioni migliori in confronto di quegli ampi edifizi ad una sola navata, i quali vennero eretti in talune grandi città pochi anni or sono. Questo fatto è messo in evidenza da due recenti rapporti della Church Building Society, ed io stesso ebbi motivo d'osservare in parecchi incontri la medesima cosa anche in piccole chiese, senza tuttavia sapere, prima di averlo letto nella fonte citata, che ciò avvenisse in generale. Per fermo taluni dei luoghi in peggiori condizioni acustiche e me noti sono edifizi con un solo tetto e di capacità assai inferiore a quella di molte chiese antiche e moderne, costruite sul sistema d'una navata principale e due laterali, chiese nelle quali numerosi devoti possono udire perfettamente bene. Per modo che, in questa, come in molte altre cose, quegli antichi architetti la sapevano assai più lunga di

noi, che, fino a pochi anni or sono, disprezzavamo le loro norme, ed ora cominciamo a seguirle ».

Il sistema degli edifizi a tetto elevato e ad una semplice navata, al quale si allude nel brano testè riprodotto, venne adottato in Inghilterra negli ultimi anni, ma con risultati assai diversi, come poteva ben attendersi, imperocchè, quantunque una tale disposizione sembri sgombrare quegli ostacoli che si oppongono alla visibilità ed all'audizione, pure in pratica si è frequentemente trovato tornare assai più difficile riempiere colla voce uno di tali ambienti, di quello che chiese, le quali occupino la medesima area, ma sien disposte nel modo ordinario, vale a dire, con una navata principale e due laterali. La ragione principale di ciò deve cercarsi nei gran vuoti che possono essere evitati col sistema delle tre navate, ma che sono inevitabili nel caso di considerevole altezza dell'edifizio e di una navata sola.

Ma v'è ancora un'altra causa, la quale contribuisce ad aumentare gli inconvenienti di quest'ultimo sistema nei riguardi acustici. Anche allorquando l'ambiente non contiene un volume d'aria maggiore di quello contenuto in una chiesa fabbricata sulla medesima area, ma secondo il sistema ordinario, le sue pareti sono molto più ampie e meno interrotte: se il soffitto ha una tendenza a produrre eco, a motivo della superficie più estesa, questo riuscirà tanto più forte. Le colonne stesse, non si può nasconderlo, sono d'ostacolo, e talvolta grave, ai comodi di taluni dei devoti, e perciò anzi in talune chiese moderne si è studiato di evitarle, sostituendo alle grandi masse murali delle colonnine di ghisa, e così si è trovato modo di realizzare i vantaggi dell'antica forma, combinandoli con quelli della moderna.

L'architetto, nel costruire una chiesa ha d'ordinario una piena libertà di assegnarne entro certi limiti le proporzioni interne, e ad ogni modo, questa libertà è di gran lunga maggiore che non quando si tratti di qualsiasi altro edifizio; infatti, ove si eccettuino rari casi che si presentano allorquando la chiesa deve erigersi in centri assai popolosi, l'area sulla quale egli deve edificare è completamente sgombra e libera. Di più, una chiesa, secondo l'opinione dei più distinti specialisti, è un edifizio di tal natura che dipende dalla prevalenza di definite proporzioni geometriche nelle varie sue parti, per cui la osservanza accurata di questa armonia fra le dimensioni delle varie parti dell'edifizio tornerà nello stesso tempo di vantaggio all'estetica di esso ed alle sue condizioni acustiche, e probabilmente tornerà tanto più vantaggiosa a quest'ultimo riguardo se, quando gli archi delle navata principale sono regolarmente spaziati, la distanza fra colonna e colonna sarà presa come unità di misura, e questo

perchè è sommamente probabile che tali colonne determineranno la posizione dei principali nodi nella intera massa d'aria messa in movimento dalle vibrazioni sonore.

Alle molte chiese fabbricate da Wren (1) si è già accennato: ed anche coloro che dissentono da lui nella questione artistica devono riconoscere il pieno successo acustico degli edifizi costruiti sul suo modello, e si accorderanno nelle vedute espresse nella celebre sua lettera già citata, dalla quale crediamo opportuno di togliere ancora i brani seguenti: « Se le chiese potessero anche contenere per ciascuna duemila persone, ciò non sarebbe ancora abbastanza; per questo esse devono essere ampie, ma secondo le esigenze della nostra religione riformata, sarebbe vano lo estenderle, quando tutti i presenti non potessero insieme udire e vedere. I cattolici infatti possono edificare le loro chiese così grandi come vogliono, poichè sono paghi quando odono il mormorio della messa, e vedono la elevazione dell'ostia, ma le nostre chiese devono essere bene adatte per un uditorio. Io non posso pensare alla possibilità di costruire un vano con stalli e gallerie in modo da contenere circa duemila persone le quali tutte possano udire il servizio divino, ed insieme vedere ed udire il sacro oratore. Io mi sono provato a far ciò nella chiesa parrocchiale di San Giacomo a Westminster, che in tali condizioni ritengo la più capace che sia stata finora costruita; eppure nelle occasioni di solennità, nelle quali la chiesa era molto affollata, io non potei discernere, stando in una galleria, che duemila persone fossero presenti. In questa chiesa, quantunque così ampia, e colla navata di mezzo ad arco, pure non sono nè muri secondari, nè lanterne, ma tutto il tetto riposa su pilastri, come pure le gallerie. Per quanto risguarda il posto del pergamo, osserverò che una voce moderata può essere udita a cinquanta piedi di distanza di fronte al predicatore, a trenta lateralmente, ed a venti dietro al pergamo, e questo a condizione che la pronunzia sia ben distinta ed uniforme, e senza che si perdano le ultime parole delle sentenze, le quali comunemente sono pronunziate in modo enfatico e che, se non sono distintamente intese, guastano il senso della frase. Per ciò che ho detto, penso sia ragionevole che la nuova chiesa sia larga almeno sessanta piedi, e lunga novanta, oltre al santuario ad un estremo, ed il posto per le campane ed il portico dall'altro ».

---

(1) Sir Cristoforo Wren viveva all'epoca del famoso incendio di Londra del 1616, il quale a lui, distinto architetto, diede occasione di ricostruire la Cattedrale di San Paolo e circa cinquanta altre chiese. Vedi infatti: *History of the modern styles of Architecture*, by James Fergusson London, 1862, pag. 266.

Le chiese costruite da Wren possono pressochè tutte essere addotte come esempi di disposizioni in ottime condizioni acustiche e in istretto accordo coi principi stabiliti nel breve estratto testè riprodotto (1): classiche nello stile, sono modellate sulla forma delle chiese gotiche in pianta e sezione. Una decisa prova della preferenza che Wren dava al tipo d'una navata principale e due laterali si è che non ostante il suo ottimo gusto architettonico, che avrebbe dovuto indurlo a moli elevate, non risulta che, eccettuate alcune poche piccolissime, egli abbia costruito chiese senza colonne nell'interno. In pressochè tutti i casi egli collocò il pergamo in qualche modo sotto la navata, mostrando così che egli contava relativamente assai poco sopra il partito che poteva trarsi dall'edifizio stesso e tutte le proporzioni della sezione trasversale lasciano una generale impressione di depressione in confronto della larghezza.

Un altro tratto caratteristico, meritevole esso pure d'esser posto in evidenza, è il largo impiego che egli soleva fare di materiale risuonante, tanto sotto forma di fodera delle muraglie quanto nelle gallerie.

Già si è parlato della sconvenienza di adottare delle gallerie negli edifizi ad uso del culto. Laddove si adottarono pertanto si trovò che vi si ode perfettamente bene, poichè in esse i sedili sono d'ordinario in forma di gradinate ed ancora perchè esse sono quasi sempre munite di una specie di riflettore e perchè finalmente la voce di un oratore è intesa assai meglio dagli uditori che si trovano ad un livello superiore a quello dell'oratore di quello che da coloro che si trovano ad uno inferiore. Per contrario i posti situati al di sotto delle gallerie sono d'ordinario in condizioni acustiche relativamente peggiori degli altri. Dopo quanto venne esposto, questo fatto non ha bisogno di alcuna spiegazione, anzi riesce a maggiore conferma di taluni principi antecedentemente esposti.

Noi abbiamo già avuto occasione di porre in evidenza alcune differenze essenziali che ai riguardi acustici passano fra un teatro ed una chiesa: qui cade in acconcio di farne rilevare altre ancora. Infatti nei teatri il suono non si produce che in una sola regione della sala, nelle chiese invece noi abbiamo tre centri fonici, cioè l'altare, il pergamo e l'organo.

---

(1) Per un giudizio a questo riguardo leggasi l'articolo *Acoustics* nel *Dictionary of Architecture*. London, 1853-54.

La determinazione della posizione del pergamo o di un luogo della chiesa, nel quale deve collocarsi un lettore od un oratore, oppure quella d'un altare, se da questo deve farsi la predica o la lettura, richiede la più grande cura, poichè si è spesso trovato che le condizioni acustiche di una chiesa variano notevolmente a seconda della posizione occupata dall'oratore. Si è infatti osservato ripetutamente in molte chiese che quando il predicatore parla dall'altar maggiore è inteso assai meglio che non quando egli occupa qualsiasi altra posizione nella chiesa. La ragione di questo fatto deve cercarsi nell' influenza esercitata dalla cappella nella quale d'ordinario trovasi l'altar maggiore medesimo, la quale, per essere di esigue proporzioni in relazione a quelle, della chiesa ed ancora a motivo delle muraglie parallele fra loro che la conterminano, è eminentemente adatta ad impedire la dispersione del suono, anzi a condurlo in una direzione, la quale coincide con quella dell'impulso iniziale ch'esso ha ricevuto.

Nelle chiese il pergamo trovasi d'ordinario collocato nella navata centrale, oppure se ne trovano due l'uno dirimpetto all'altro (amboni) e varia soltanto la distanza alla quale esso od essi si trovano dal santuario.

Varie sono le ragioni, le quali potrebbero essere addotte contro l'antico uso di collocare il pergamo nel mezzo della navata principale, ragioni di proprietà, di convenienza, sulle quali sarebbe qui affatto fuori di luogo l'insistere: ci contenteremo pertanto di notare come un pergamo fissato da una parte della navata permetta al predicatore di abbracciare ad un tempo coll'occhio la massima parte del suo uditorio.

Per evitare dannose riflessioni sarà anzitutto opportuno di rivolgere tutta la attenzione alla forma da darsi al soffitto della chiesa.

Anche a questo proposito abbiamo motivo di avvertire come sia essenzialmente diverso l'ufficio che è chiamato ad esercitare il soffitto nei teatri e nelle chiese. Nei teatri il soffitto può venire in aiuto alla propagazione del suono per gli spettatori che si trovano negli ultimi ordini, mentre ciò non avviene nelle chiese, quando le loro dimensioni nei rapporti coll'altezza non escano dalle proporzioni ordinarie. In queste il soffitto si trova sempre in generale ad una altezza abbastanza grande sul centro fonico da poter produrre dannosi prolungamenti del suono e perfino da ingenerare degli echi. Avverrà quindi di dover distruggere il suono riflesso dal soffitto in modo che esso non possa avvertirsi oltre al diretto. A questo proposito pertanto noi ci limiteremo a ricordare i risultati sperimentali dello Scott Russell,

i quali, come si è già avvertito, si verificano pure per le vôlte e per i soffitti.

Quando tuttavia le dannose riflessioni già esistano, spesso la sola risorsa consiste nell' uso di cortinaggi, o tende, o panneggiamenti, oppure in quello dei fili, risorsa tuttavia alla quale sarà bene non ricorrere in tal caso se non dopo aver inutilmente tentata la applicazione di varie forme di riflettore. Naturalmente è bene potersi dispensare così dall'uno come dall'altro palliativo, ma senza dubbio fra i vari rimedi i riflettori sono i migliori dei quali si possa disporre, e considerando con quanta facilità possano essere messi in opera, non v'ha dubbio che debbano costituire lo scopo dei primi tentativi per migliorare le condizioni acustiche d'una chiesa, particolarmente nel caso in cui vi sieno fondati motivi per ritenere che il difetto derivi da un eccesso di spazio vuoto all'intorno e al disopra dell'oratore.

Dei riflettori ci siamo già occupati nella seconda parte del presente lavoro, più però per riferire risultati di esperienze sulla riflessione del suono che per altro: qui pertanto ci proponiamo di ritornare sull'argomento entrando in qualche maggior particolare relativamente alla loro applicazione ai pergami delle chiese.

Pressochè tutti i pergami delle chiese sono muniti di riflettore, ma un semplice sguardo basta a mostrare che nella maggior parte dei casi non lo si considerò che come un accessorio di decorazione del pergamo, del quale, così come lo si trova costruito, il più delle volte si potrebbe fare a meno, nullo o quasi nullo essendo il vantaggio che ne risentono le condizioni acustiche della chiesa. Come mediante una forma appropriata di riflettore possa rinforzarsi il suono a grande distanza mostra la fig. 34.

Sia il centro fonico in O e si assuma che per effetto del movimento di chi parla esso non possa spostarsi che di circa $0^m,33$ dall' una e dall' altra parte di O. Supponiamo il riflettore costruito in legno e foggiato secondo una superficie di rivoluzione, la cui sezione è rappresentata da una curva a due centri x ed y. I raggi sonori diretti si denotino con a, b... f, g, quelli riflessi dal riflettore con 1, 2... 9, 10 e le linee punteggiate denotino i limiti del suono riflesso per un movimento del centro fonico di circa $0^m,33$. Si conducano nella pianta, corrispondentemente alla divisione della sezione verticale, dei raggi sonori a partire dal centro O. Nei piani verticali che ad essi corrispondono, si muoveranno i raggi sonori diretti e riflessi relativi a questa divisione, in modo che per le onde sonore riflesse in pianta non avviene dispersione maggiore o minore di quella

che si verifica per le dirette, ma uniformemente per le une e per le altre. Perciò la distanza dei raggi sonori diretti vicini, come pure quella degli indiretti nella sezione verticale, somministra nel rapporto inverso la intensità dei rispettivi effetti sonori.

Vediamo di chiarire un po' meglio con un caso concreto questo concetto che a prima giunta si presenta un po' oscuro. Se si considerano i raggi sonori *f* e *g*, e 9 e 10 ad una distanza di 50 metri dal centro fonico, si trova quivi la distanza *f-g* oltre il doppio di quella che passa fra 9 e 10, quindi la intensità sonora, astrazione fatta dalla perdita di riflessione, minore della metà. A quella distanza quindi mercè il riflettore si guadagnerà una intensità più che doppia, e si otterrà un'intensità sonora quale mercè il solo suono diretto non si avrebbe alla distanza di $\frac{50^m}{\sqrt{3}}$ circa 29 metri.

A distanze più piccole il suono si distribuisce in modo analogo, in maniera da ottenere un notevole rinforzo al suono diretto. Così a 30^m la distanza fra *e* ed *f* è quasi doppia di quella da 7 ad 8, il

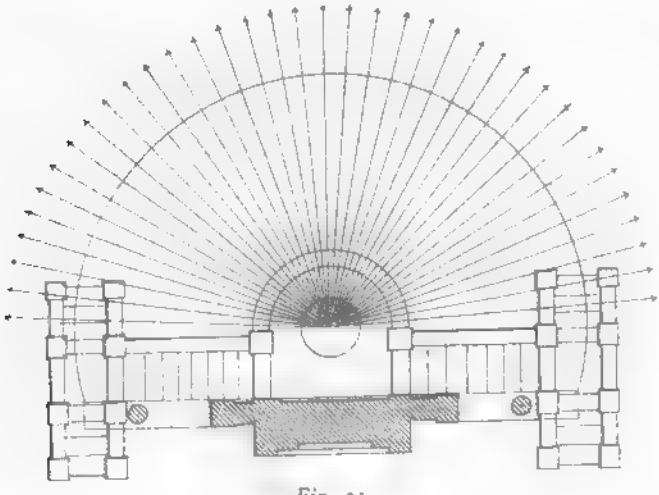


Fig. 35.

suono indiretto ha quindi una intensità pressochè doppia del diretto. Se quindi si assume che a questa distanza il suono indiretto abbia una intensità 1,7 di quella del suono diretto per la distanza medesima, allora l'effetto sonoro totale sarà 2,7 la intensità del suono diretto sempre per la medesima distanza, e quindi avrà nel complesso lo

Fig. 34.
Fig. 36.

Fig. 34
Fig. 36.

stesso effetto come il suono diretto ad una distanza di $\frac{30^m}{\sqrt{2,7}}$ = circa 18 metri.

Di qui si scorge adunque quanto notevolmente dei riflettori opportunamente costruiti possano rinforzare il suono a grandi distanze.

Nella fig. 35 abbiamo disegnato la proiezione orizzontale d'uno di tali riflettori col pergamo relativo.

In alcuni casi, nei quali il centro fonico deva per esigenze imprescindibili collocarsi a poca altezza dal piano sul quale trovasi l'uditorio si consiglia come opportuna la posizione in opera di un riflettore al di sotto del pergamo, il cui effetto, senza bisogno di ulteriori illustrazioni, è indicato dalla fig. 36.

Intorno ai materiali coi quali costruire i riflettori si è già detto qualche cosa, quando, per la prima volta, si trattò dei mezzi coi quali venire in aiuto alla propagazione del suono in generale. Qui poi in particolare, per ciò che si riferisce ai grandi ambienti, riportandoci ai risultati ottenuti da alcune indagini sperimentali dell'Orth (1), noteremo che quando il suono vogliasi mandare a grande distanza mediante il riflettore, torna sempre opportuno costruire questo di marmo ben pulito, ma che in casi particolari e specialmente allorquando si tratta di rinforzare una voce esile e che non debba farsi udire a grandi distanze, l'impiego del legno non sarà da rigettarsi, perciò che la risuonanza tutta propria di questo materiale contribuisce a rendere, come suol dirsi con termine tecnico, più rotonda la voce dell'oratore.

Qualunque sia pertanto il materiale del quale si troverà opportuno di costruire il riflettore, dovrà aversi speciale riguardo a lasciarlo spoglio di qualsiasi ornato, senza parti salienti, senza cornici e sopratutto senza quei fantastici panneggiamenti coi quali talvolta usasi di adornare i pergami delle chiese, poichè tanto le parti salienti quanto gli ornati interromperebbero la superficie di riflessione che deve essere ben pulita, ed i panneggiamenti od i cortinaggi smorzerebbero in parte le onde sonore là appunto ove è desiderabile che esse si

(1) *Die Akustik grosser Raüme mit speciellem Bezug auf Kirchen* von A. Orth. Besonderer Abdruck aus der *Zeitschrift für Bauwesen*. Jahrgang 1872. Berlin, 1872, pag. 15. — Importanti notizie sopra gli effetti dei riflettori nel caso di suoni intensissimi sono somministrate dall'Henry nell'*Annual Report of the Board of Regents of the Smithsonian Institution* for the year 1878. Washington, 1879, pag. 464-465, 493, 511.

espandano con tutta la loro intensità, cioè in vicinanza al centro fonico.

Un criterio generale per scegliere l'altezza e la posizione più opportuna per il riflettore, sarà quello di non rinforzare il suono se non utilizzando quelle fra le onde sonore che, ove non venissero riflesse, andrebbero perdute per l'uditorio. Ad ogni modo sarà bene di procedere a questa determinazione per via di successivi esperimenti. Se il riflettore sarà applicato orizzontalmente, assai probabilmente tornerà utile di collocarlo precisamente al di sopra dell'oratore, ma se si troverà conveniente di inclinarlo un po' all'insù, posizione nella quale in grandi ambienti, particolarmente se muniti di gallerie, esso torna più efficace, sarà bene che il riflettore sia tenuto alquanto all'indietro.

Quanto fu già detto intorno ai riflettori potrà fornire all'architetto una qualche idea sulla forma speciale da darsi al riflettore a seconda della diversità delle circostanze che ne richiedono l'applicazione. Talvolta, e particolarmente nel caso in cui vi sia motivo di temere un eco, uno schermo verticale di dietro all'oratore, con o senza riflettore sopra il pergamo tornerà vantaggioso. Qualunque sia il partito al quale si appiglierà l'architetto, dovrà sempre tener presente come regola invariabile che, nè schermo, nè riflettore dovranno mai essere immediatamente vicini all'oratore, poichè un certo spazio, un certo volume d'aria tutto all'intorno del centro fonico è sempre necessario.

Fra i vari argomenti che ai riguardi acustici devono formare soggetto di studio per parte dell'architetto havvi, come abbiamo già incidentalmente avvertito, quello della posizione da assegnarsi all'organo. Le precauzioni essenziali da prendersi a questo riguardo furono riassunte da Bloomfield nei termini seguenti (1): « L'organo, il più bello fra gli strumenti musicali, quando è perfetto, è uno dei più sgradevoli quando sia trascurato, ed ognuno deve riconoscere quanto esso sia sensibile all'umidità ed in genere alle variazioni atmosferiche. Se la chiesa ha coro, l'organo dovrebbe sempre esservi collocato, ed il posto più conveniente per esso, in caso diverso, è in una navata lateralmente al santuario (*organ chamber*) fabbricata espressamente per esso. L'effetto dello strumento sarà di molto aumentato e lo si manterrà meglio intonato se le muraglie sieno foderate di assicelle e nel

(1) *Paper on Church arrangement read before Architectural Association.* Nel giornale *The Builder* del dicembre 1860.

caso in cui non sia situato in una galleria dovrà sempre trovarsi elevato di alcuni piedi sul pavimento ». A questo potrebbe aggiungersi che se l'architetto non può dettare condizioni sulla costruzione dello strumento ed ha motivo di credere che l'organo essendo costruito per una chiesa qualunque abbia una potenza, per esempio, doppia di quella che realmente dovrebbe avere nei riguardi delle dimensioni dell'edifizio da lui costruito, egli dovrà collocare l'organo in una posizione piuttosto che in un'altra, a seconda che si giudichi opportuno di smorzare gli effetti o di aumentarli.

§ II.

Sale per pubbliche radunanze, concerti, ecc.

Per le sale aventi per iscopo di raccogliere pubbliche radunanze potrebbe, senza pericolo di cadere in errore, dirsi in via assoluta che la forma più semplice, cioè la rettangolare in pianta e sezione, la quale presenti per conseguenza muraglie piane, pavimento orizzontale e piano, soffitto piano, e quindi abbia tutti i raccordamenti ad angoli retti è fra tutte la più soggetta a difetti acustici e che le probabilità di successo acustico vanno aumentando a mano a mano che si discosta da questo tipo.

Il pavimento piano di un ambiente così conformato lo rende soggetto alla interruzione delle linee rette di visione e di audizione; le sue pareti piane ed i suoi angoli retti facilitano la riflessione di onde condotte; le pareti piane in faccia alla posizione del centro fonico sono capaci di produrre l'eco, e l'altezza uniformemente uguale fornisce una massa d'aria al di sopra ed al di dietro del luogo dove si genera il suono, la quale potrebbe tornare nociva; le finestre e le lanterne, quando partecipino esse pure della uniforme rettilineità, offriranno ciascuna il loro piccolo cubo d'aria capace di essere posto in vibrazione e di causare quindi, per tal via, un nocivo eccesso di risonanza, mentre la ininterrotta vacuità dello spazio aggrava il male permettendo all'eco, una volta prodotto, di continuare quanto può senza urtare in verun ostacolo atto ad interromperlo.

Si comprende già come la introduzione di particolari architettonici di qualsiasi specie tenderà a diminuire in qualche parte questi gravi inconvenienti.

La formazione d'uno sfondo per l'orchestra o una piattaforma ad un estremo, il mascherare od interrompere o curvare la parete opposta, la ornamentazione delle pareti o del soffitto, o limitatamente di ambedue, lo arrotondare inoltre gli angoli, ecc., sono tutti, non soltanto mezzi di effetto architettonico, ma altresì tentativi per evitare l'insuccesso acustico.

Taluni fra questi espedienti sono applicabili in generale agli edifizi anche più economici, ma talvolta tornerà pur necessario edificare ambienti di larghe proporzioni di pianta e sezioni perfettamente rettangolari. Il primo espediente al quale tornerà opportuno d'appigliarsi in simili emergenti sarà quello di evitare soverchie altezze, ed oltre a questo tornerà inoltre conveniente evitare per quanto è possibile le ampie superficie a rinzaffo ■ le profonde strombature per porte, finestre e lanterne, procurando finalmente di ottenere una qualche semplice proporzione numerica fra le varie dimensioni dell'ambiente. Se a questi ovvii espedienti possa aggiungersi l'impiego di materiale risuonante in vicinanza al centro fonico sotto la forma di fodere di legno, ed ancora la applicazione di panneggiamenti o cortinaggi nelle parti più lontane dell'ambiente, dove probabilmente si avrebbe un eco, si sarà fatto tutto ciò che è possibile di fare in casi nei quali non si può ricorrere se non all'uso di mezzi assai limitati.

I difetti che si deplorano in ambienti di simil specie derivano pressochè sempre da eccessiva sonorità, che assume talvolta la forma di eco, e per conseguenza i migliori palliativi consistono, oltrechè nell'impiego dei cortinaggi, stuoie, ed altre sostanze non riflettenti, nella giudiziosa scelta della posizione da assegnarsi rispettivamente alle località nelle quali devono trovarsi il centro fonico e l'uditorio.

Se ora noi rivolgiamo l'attenzione nostra agli ambienti di piccole proporzioni come sono, per modo di esempio, certe sale di lettura di società scientifiche ■ letterarie o per uso di conferenze od altri simili scopi, noi troviamo che per esse pure si richiede una certa conoscenza delle leggi di acustica per ben adattarle all'uso al quale devono servire, poichè troppo di frequente esse offrono condizioni acustiche deplorevolissime. Una fra le cause principali di ciò consiste nella sproporzione che ambienti di simil genere presentano; un'altra la vuota nudità che spesso hanno comune cogli ambienti della più semplice specie; una terza consiste nella breve distanza che la voce deve percorrere prima di incontrare la muraglia od altra superficie, dalla quale, se vi ha motivo ad eco, questo non manca di esser prodotto.

Imperocchè non deve supporsi che per produrre un eco in una

sala, questa abbia d'uopo d'una lunghezza di circa 15 o 20 metri, per modo che l'eco possa essere ripercosso ad una distanza apprezzabile di tempo dopo il suono originale. In appartamenti di moderatissime proporzioni l'eco può riuscire percettibilissimo, e tale eco, che segue istantaneamente il pronunziare di una parola, reca quasi altrettanta noia e confusione quanto quello che è udito dopo breve intervallo, mentre naturalmente quanto la parete riflettente sarà più vicina al centro fonico, tanto più forte sarà il suono riflesso.

Gli espedienti che possono essere adottati in simili casi sono di genere diverso e assai più che il dare precetti assoluti è da prendersi consiglio dalle circostanze e dalle condizioni particolari nelle quali si trova l'ambiente, oppure dalla sua destinazione.

Così, per modo di esempio, in generale tornerebbe opportuno lasciare la muratura delle pareti (purchè accuratamente eseguita) senza rinzaffo nè arricciatura: sarà opportuno abbandonare le lanterne e sostituirle con finestre. La formazione d'uno sfondo ad un estremo e l'adozione d'una galleria all'altro sono misure bene adatte per gli scopi ordinari ai quali simili ambienti devono servire e che d'altra parte ne agevolano il successo acustico.

Ancora relativamente agli ambienti di proporzioni relativamente esigue e che, non ostante le moderate loro dimensioni possono tuttavia presentare difetti essenziali nei riguardi acustici, osserveremo come accada di frequente che in pubblici istituti, avendosi a costruire in un determinato piano varie scuole di grandezza diversa le une dalle altre, ciò non ostante si dia loro la medesima altezza: è naturalmente impossibile che questi vari ambienti soddisfino tutti in uguale misura alle esigenze acustiche. Gli ambienti di forma cubica, per esempio, del pari che quelli eccessivamente alti, sono d'ordinario in cattive condizioni acustiche, od almeno esigono per parte di chi parla uno sforzo considerevole e perciò dovranno essere evitati. Per lo contrario le forme circolari od ottagonali sono specialmente da raccomandarsi.

In una sala destinata a scopi musicali o nella quale deve trattarsi di pubblici affari, l'architetto opererà saggiamente evitando le soverchie forniture in istoffe: e se ci sono cortinaggi in un ambiente nel quale si faccia della musica, sarà bene di tenerli intieramente nelle strombature delle finestre; torneranno fino ad un certo punto utili i pavimenti in legno, specialmente se con essi potrà dispensarsi dall'uso di tappeti. Tappeti, che, in altri casi, potranno invece essere trovati opportunissimi per ismorzare il rumore dei passi in quegli

ambienti nei quali sia preferibile il perdere un po' di sonorità all'inconveniente di essere disturbati da altri rumori.

Venendo poi a trattare delle sale di maggiori proporzioni, noteremo che se in queste vi è maggiore opportunità di introdurre ornati architettonici, minor rischio di altezza sproporzionata e minori probabilità di forti echi, di quello che in ambienti di proporzioni moderate, non deve d'altra parte nascondersi che nei grandissimi ambienti le pareti ed il soffitto sono così grandi e la massa d'aria contenutavi così forte che quanto in un piccolo ambiente potrebbe costituire un inconveniente insignificante, darebbe occasione ad ostacoli formidabili in uno di grandi proporzioni.

La comparativa debolezza dell'eco prodotto dalla voce d'un oratore non toglierebbe la possibilità di violente interferenze quando il locale fosse usato per concerti musicali e la immensa difficoltà di rimediare a consimili imperfezioni contribuisce a fare del successo acustico un argomento della più grande ansietà per l'architetto. E deve ascriversi a fortuna che si abbia fondato argomento per credere che le considerevoli proporzioni di un ambiente contribuiscano da per loro a togliere parte degli ostacoli che alla perfetta audizione si oppongono negli ambienti piccoli.

Le grandi sale odierne, quali si trovano particolarmente in Inghilterra, sono o secondo il tipo delle antiche romane, quali si riscontrano nel centro delle terme, oppure sono ingrandimenti o perfezionamenti della forma sulla quale sono foggiate le moderne sale rettangolari. Il tipo delle prime non è invero bene adatto ad un pubblico, il quale ivi convenga per udire un oratore, ma piuttosto si confà ad assemblee ed a rappresentazioni; quello delle seconde, costruite esclusivamente per udirvi musica o discorsi, riveste la forma delle grandi aule dei tempii medio-evali e di quelle grandi chiese senza colonnami interni, quali solevano fabbricare nei tempi di loro maggior potenza gli ordini religiosi dei predicatori.

Un confronto istituito fra le poche grandi sale nelle quali il successo acustico sia completo, mette in evidenza una grande varietà in certe caratteristiche, ma un generale accordo nei punti essenziali per i quali un edifizio si appalesa bene adatto a dirigere ed a preservare dalla dispersione il suono prodotto ad una delle estremità. Il soffitto può essere incurvato od inclinato in varie guise, ma non lo si trova mai perfettamente orizzontale, ed anzi non mancano esempi, come quello offerto da Exeter Hall, nel quale, avendosi dapprima un soffitto orizzontale, si trovò opportuno di sostituirlo con altro incli-

nato, raggiungendosi per tal modo non lievi vantaggi ai riguardi dell'acustica.

Uno dei migliori esempi di una sala di grandissime proporzioni, la quale si trovi in ottime condizioni acustiche è offerto dalla Free Trade Hall di Manchester, riedificata dall'architetto Walters, ed alla quale si riferiscono le figure 37, 38, 39, che ne rappesentano rispettivamente la pianta all'altezza della galleria, una sezione longitudinale ed una sezione trasversale.

Si richiedeva qui, come nella maggior parte degli edifizi di simil genere, che la sala riuscisse bene adatta tanto a concerti musicali che a pubblici discorsi: che un numeroso uditorio potesse trovarvi posto, e che finalmente ad una solidità senza eccezione si accoppiasse anche una certa tal quale eleganza architettonica.

Le dimensioni offerte dalla gran sala sono invero considerevoli. Essa è alta 52 piedi, larga 78, lunga 135, compreso lo sfondo per

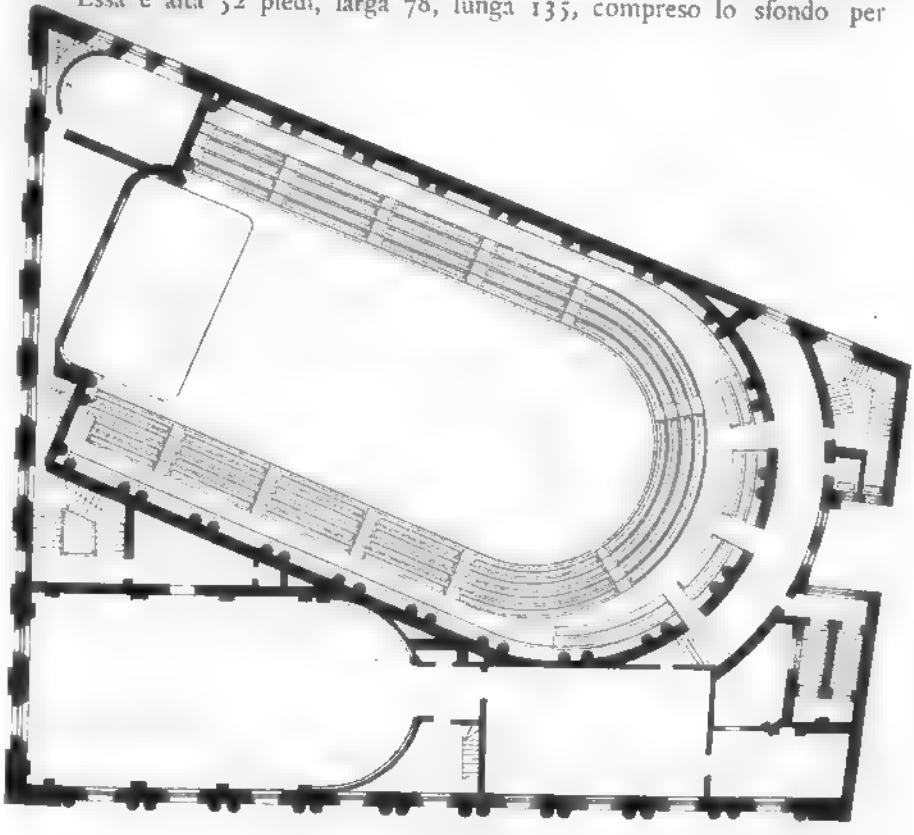


Fig. 37.

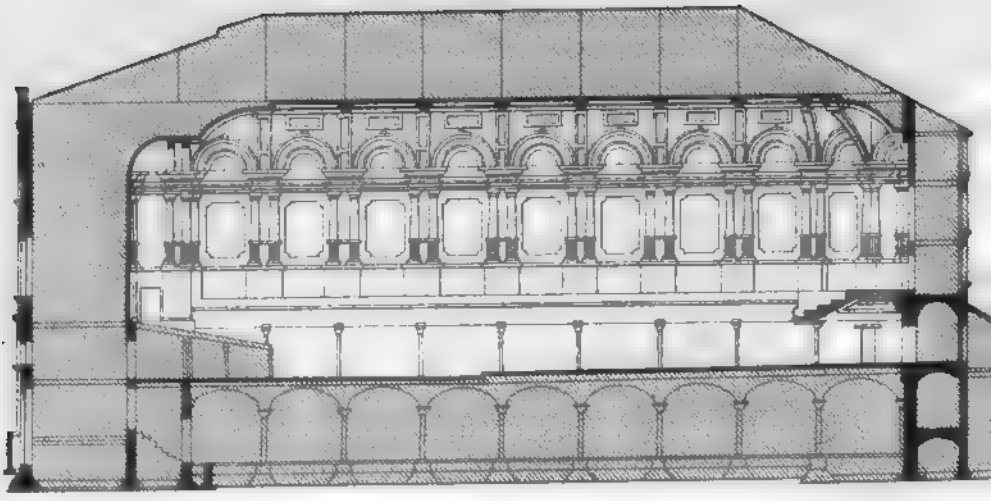


Fig. 38.

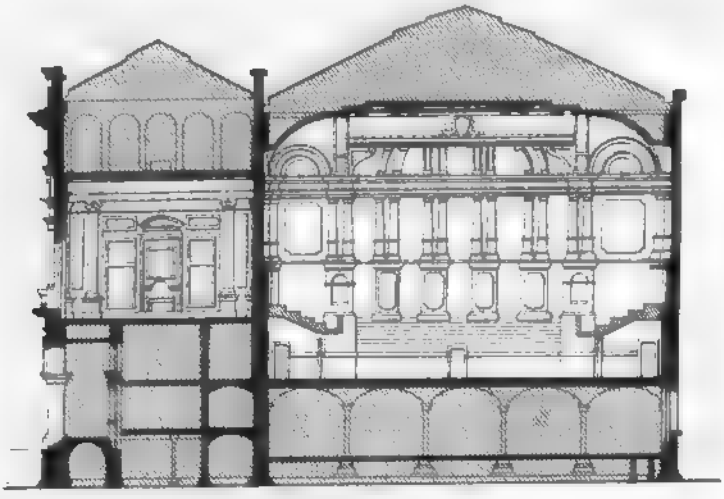


Fig. 39.

l'orchestra, e 123 senza di esso; per tal maniera l'altezza ha colla larghezza, ed approssimativamente colla lunghezza, la semplice relazione numerica di 2 a 3 e di 2 a 5, l'unità essendo di 28 piedi.

La pianta è rettangolare con uno sfondo per l'orchestra ad un estremo ed un tratto semi-circolare dall'altro. Il soffitto, come mostra

la sezione trasversale, è a scompartimenti e si congiunge colle muraglie mediante raccordamento curvilineo. Il pavimento della sala è leggermente inclinato: l'inclinazione cominciando a circa un terzo della lunghezza della sala a partire dalla piattaforma, la differenza di livello essendo di circa due piedi.

Una galleria ricorre lungo la sala, occupandone i fianchi e l'estremo di facciata alla piattaforma. Le pareti al di sotto della galleria sono piane e superiormente sono interrotte da colonne sormontate da archi, cosicchè per tal modo da una parte le ondulazioni sonore non vengono interrotte ■ dall'altra si impedisce l'accumulazione di una onda di suono condotto. Nella parte della sala, che è conformata a semi-cerchio e dove avrebbe potuto temersi la formazione di un eco, tutte le cure furono prese onde evitarlo ed a tale scopo giovò, oltre la forma curvilinea, l'avere ancora in ogni modo interrotta la continuità della superficie delle pareti.

Sotto le gallerie sono cinque ampie porte di ingresso, coperte di cortinaggi: la galleria istessa diventa più profonda nel tratto semicircolare che non in quelle laterali, onde arrestare più efficacemente il suono che potrebbe raggiungere la muraglia posteriore ed essere ripercosso.

L'ambiente vuoto presenta, è vero, una sonorità piuttosto forte; ma, quando è pieno, soddisfa in sommo grado tanto nel caso di concerti come in quello di discorsi.

Il materiale risuonante impiegato non è molto, la maggior parte di esso essendo concentrato nell'orchestra, cioè là appunto dove può tornare più utile. Una risonanza considerevole è tuttavia procurata dagli spazi vuoti che trovansi sopra il soffitto e sotto il pavimento e probabilmente, a giudicarne dagli ottimi effetti, è a ritenersi che l'architetto abbia in ciò fare raggiunto precisamente il limite fino al quale l'aumento degli spazi vuoti giova alla sonorità dell'ambiente, oltrepassato il quale invece essa diventa eccessiva.

La Surrey Music Hall, della quale le figure 40, 41, 42 rappresentano rispettivamente metà pianta del piano terreno ■ metà pianta del primo piano, una sezione longitudinale, ed una sezione trasversale, costituisce essa pure un ottimo esempio di ambiente di grandi proporzioni, il quale si trova in buone condizioni acustiche, ■ poichè talune delle disposizioni in questo caso adottate sembrano essere in aperto contrasto con quelle dell'edifizio, del quale ci siamo testè occupati, così giudichiamo opportuno di entrare anche a tale proposito in alcuni particolari.

Noi ci troviamo qui di fronte ad una costruzione leggiera, circondata da ordini di gallerie sovrapposte le une alle altre, con una cupola elevata sopra una serie di colonne interne ed il pavimento a

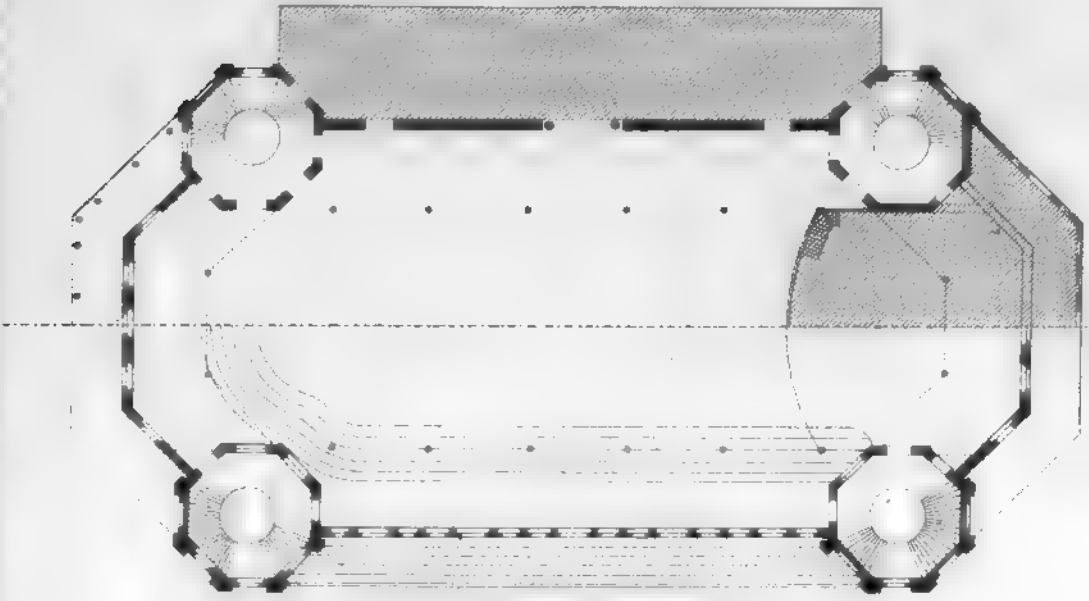


Fig. 40.

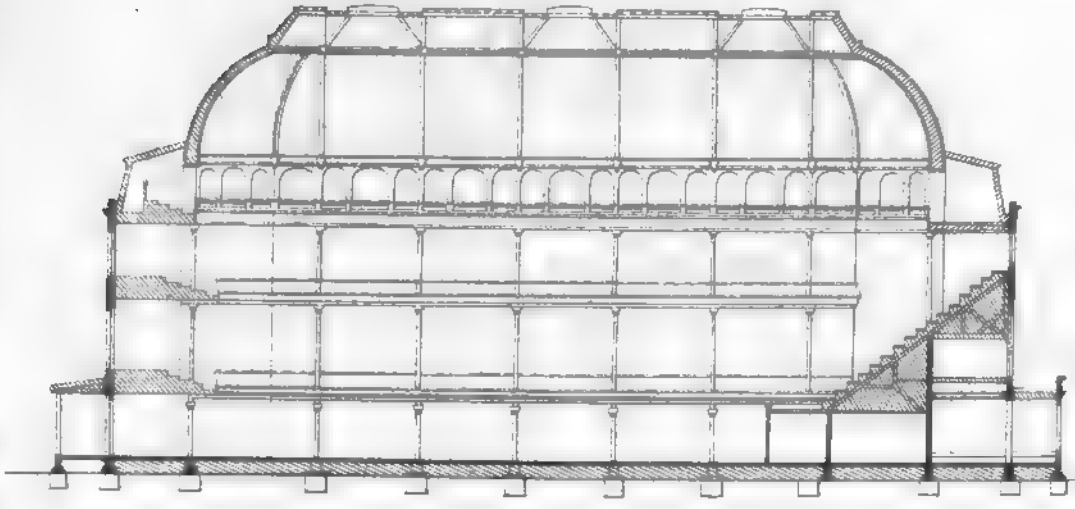


Fig. 41.

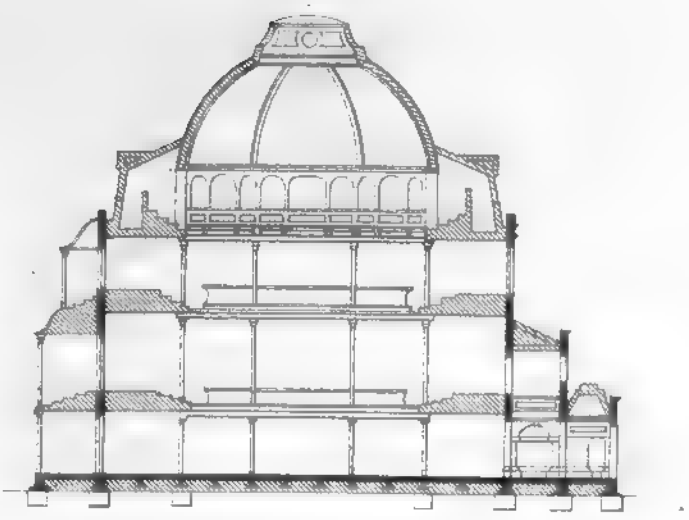


Fig. 42.

livello del suolo, col quale comunica direttamente per mezzo di molte porte. I punti di contatto colla Free Trade Hall sono la disposizione generale dell'edifizio (oblungo coll'orchestra ad uno degli estremi), la forma accuratamente determinata ed assegnata all'estremità della sala, alla sezione del soffitto, alla fronte delle gallerie, ecc., lo sfondo per l'orchestra, le buone proporzioni, la massa d'aria dell'edifizio relativamente ristretta, le cure nell'evitare la formazione dell'eco ed il giudizioso impiego della risonanza nel sostenere il suono.

La forma generale della sala può dirsi un ottagono allungato od un rettangolo ad estremi semi-ottagonali. Vi sono tre ordini di gallerie, sostenute da leggiere colonne in ferro. Il soffitto superiormente allo spazio centrale è di sezione cupoliforme, quello sulle gallerie inclinato.

La forma fortemente inclinata della gradinata per l'orchestra taglia fuori uno spazio vuoto assai grande dietro gli esecutori e dal soffitto che li copre, ma per restringere ulteriormente lo spazio un ampio riflettore, non segnato nelle figure, costruito di legno bene stagionato ed asciutto, è fatto pendere sopra l'orchestra.

La massima lunghezza della sala è di 163 piedi e 6 pollici, la larghezza 65 piedi ■ 7 pollici e l'altezza computata al disotto della nervatura del soffitto è la stessa, cosicchè la larghezza sta all'altezza ed alla lunghezza rispettivamente come 1 ad 1 ed 1 a 2 $\frac{1}{2}$.

In questo edifizio noi troviamo fatto larghissimo uso di materiale risuonante e oltre all'essere in legno l'orchestra, le gallerie ed il riflettore, tutte le pareti sono foderate di assicelle: tutto ciò allo scopo di procurare una maggiore risuonanza.

Il successo di questa sala nei riguardi acustici e per iscopi musicali, fu, sotto ogni riflesso, completo: numerossimi uditorii, perfino di 8000 persone distribuite nelle varie parti dell'ambiente, poterono udire perfettamente e la sala, a dire dello Smith, che qui pure ci serve di guida, era alcuni anni or sono considerata dai musicisti come la migliore di quante esistano a Londra, per le sue proprietà acustiche.

Chiuderemo il presente paragrafo con alcuni ragguagli e con alcune considerazioni intorno alla sala da concerto costruita nel palazzo del Trocadero, nell'occasione in cui si tenne a Parigi l'ultima (1878) esposizione universale.

Prendendo per base i principi ormai indiscutibili stabiliti dall'acustica intorno alla formazione dell'eco, gli architetti Davioud e Bourdais si prefissero che tutte le superficie collocate ad una distanza superiore a 17 metri dall'orchestra fossero rese assorbenti il suono: tali superficie sono rappresentate dalle muraglie, dalla vôlta, dalla sala intera insomma destinata al pubblico (1). Vi si tese perciò una stoffa di borra di seta, sulla quale, prima di metterla in opera, erasi dipinta la decorazione. Per lo contrario tutte le superficie collocate ad una distanza dall'orchestra minore di 17 metri potevano ripercuotere il suono, anzi, secondo i calcoli degli architetti, lo dovevano per rinforzarlo nelle sole condizioni possibili, rinforzo che doveva essere tanto più utile per ciò che l'assorbimento forzato di tutto il rimanente della sala doveva tendere a renderla assolutamente sorda, sopratutto se si consideri la sua ragguardevole estensione (50 m. di diametro e 30 m. d'altezza) ed il notevole numero (4665) degli spettatori che essa doveva poter contenere.

La questione principale, secondo gli architetti, era quindi ridotta a trovare la forma da darsi a queste superficie. Si comprende che perchè tal forma riuscisse veramente utile, non bastava che esse superficie potessero rimandare verso la sala dei raggi riflessi, era mestieri che non li rimandassero se non sugli spazi occupati dal pub-

(1) Exposition Universelle de 1878. *Le palais du Trocadèro*. Paris, 1878. Nell'elenco delle varie spese sostenute, la stoffa figura per L. 20,000 (pag. 167).

blico. Le pareti dell'orchestra non potevano soddisfare a queste condizioni, perchè essendo necessariamente verticali, i raggi di incidenza provenienti dall'orchestra, situata al di sotto, dovevano, per effetto della riflessione, prendere necessariamente una direzione dal basso all'alto che li avrebbe rimandati nelle parti alte della sala e non occupate dal pubblico: gli architetti adunque pensarono che tutto l'effetto di rinforzo possibile del suono per riflessione doveva cercarsi nel tracciato della vôlta sopra l'orchestra.

Per raggiungere questo scopo si decompose la vôlta in dieci fusi e ciascuno di essi in dieci zone, indi, praticando nella sala stessa una divisione analoga sulle diverse parti occupate dai seggi, si ottennero sopra ciascuna di queste due superficie cento divisioni che dovettero nel pensiero degli architetti corrispondersi l'una all'altra: ogni centesima parte della vôlta corrispondendo ad una centesima parte della sala. Si determinò la posizione di questi cento elementi della vôlta in modo da soddisfare agli effetti di riflessione, dei quali si è tenuto precedentemente parola, ed infine tangenzialmente a tali elementi venne tracciata una superficie curvilinea, inviluppata da queste zone riflettenti.

A questo punto del lavoro gli architetti vennero côlti da qualche scrupolo sul procedimento seguito e da qualche timore sul risultato di così delicata operazione, per cui, prima di procedere oltre, desiderarono di tentare una esperienza preventiva, ed a tale scopo fecero costruire un modello della sala in piccola scala, eseguito in rame battuto, argentato e pulito allo scopo di approfittarne onde sperimentare l'effetto d'una riflessione ottica sostituito a quello d'una riflessione acustica. Una luce elettrica essendo stata collocata nel centro dell'orchestra, fu ripercossa ugualmente dalla vôlta argentata su tutti i posti del piccolo modello della sala e su questi posti soltanto. Questo risultato pertanto pose in evidenza che, adottando la suaccennata disposizione il rinforzo dei suoni sarebbe stato indistintamente uguale per tutti i posti, mentre in realtà tutti i posti non ne abbisognavano in uguale misura, quelli in vicinanza dell'orchestra potendo farne a meno, richiedendone invece uno maggiore quelli più lontani.

In seguito a tali considerazioni si eseguì un nuovo tracciato, il quale aumentasse considerevolmente l'importanza delle parti riflettenti corrispondenti agli ultimi posti e diminuisse notevolmente quelle relative ai primi.

Tale è il principio al quale si informa il tracciato della vôlta, chia-

mata più o meno propriamente « conca acustica » e che venne eseguita con mattoni cavi ricoperti d'una serie di strati d'intonaco successivamente distesi fino a siccità ed induramento completo.

L'effetto pratico della conca acustica sotto il punto di vista del rinforzo del suono sembra esser stato completo, ma altrettanto non può dirsi dell'assorbimento per parte delle pareti delle muraglie e della vôlta, poichè sotto l'effetto dei grandi *fortissimo* e sopratutto sotto la influenza di certi suoni l'assorbimento è tutt'altro che completo, anzi talvolta si produce un eco.

Varie potrebbero essere le cause di tale inconveniente, ed assai probabilmente tutte vi hanno parte: facciamoci a studiarle più attentamente.

Anzitutto il fatto che l'avvertito difetto non è oggidì così sensibile come lo era nei primi tempi in cui la sala del Trocadero venne aperta al pubblico, ci induce a pensare che una qualche parte dell'accennato inconveniente dovesse attribuirsi alla non perfetta secchezza delle pareti, perciò che questa sala, nella quale si lavorò continuamente di giorno e di notte, giovandosi della luce elettrica, appena veniva a mancare quella del sole, venne aperta al pubblico il 5 giugno 1878, mentre non fu ultimato l'edifizio se non alla fine del mese stesso (1). È quindi assolutamente impossibile che le pareti si trovassero in quello stato di perfetto prosciugamento che, come vedemmo, ha tanta parte nelle condizioni acustiche di un ambiente. Ma si afferma che questa causa di insuccesso tende a diminuire di giorno in giorno e che verrà tempo in cui sarà completamente sparita (2).

In secondo luogo l'impiego della stoffa di borra di seta venne fatto senza dubbio assai giudiziosamente, ma affrontando in certo qual modo una incognita. Con un corredo d'esperienze così limitato è infatti una incognita quasi assoluta il grado di assorbimento o, come tecnicamente si direbbe, il coefficiente d'assorbimento del suono per parte della stoffa, non risultandomi che alcuno se ne sia finora, exprofesso, occupato. Oggidì quindi non siamo al caso di dire se lo spessore della stoffa adoperata fosse sufficiente allo scopo, e se, come pare,

(1) Exposition Universelle de 1878. *Le palais du Trocadéro.* Paris, 1878, pag. 173.

(2) « Je sais bien, scrive argutamente il GARNIER (*Le Théâtre*, Paris, 1871, pag. 212), que les salles se *font* à la longue comme le vin mis en bouteille ».

si è disposti a raddoppiarlo, si aprirà un campo d'esperienza affatto nuovo ed i cui risultati torneranno di grande utilità. Ad ogni modo non è fuori di luogo il pensare che il potere assorbente della stoffa

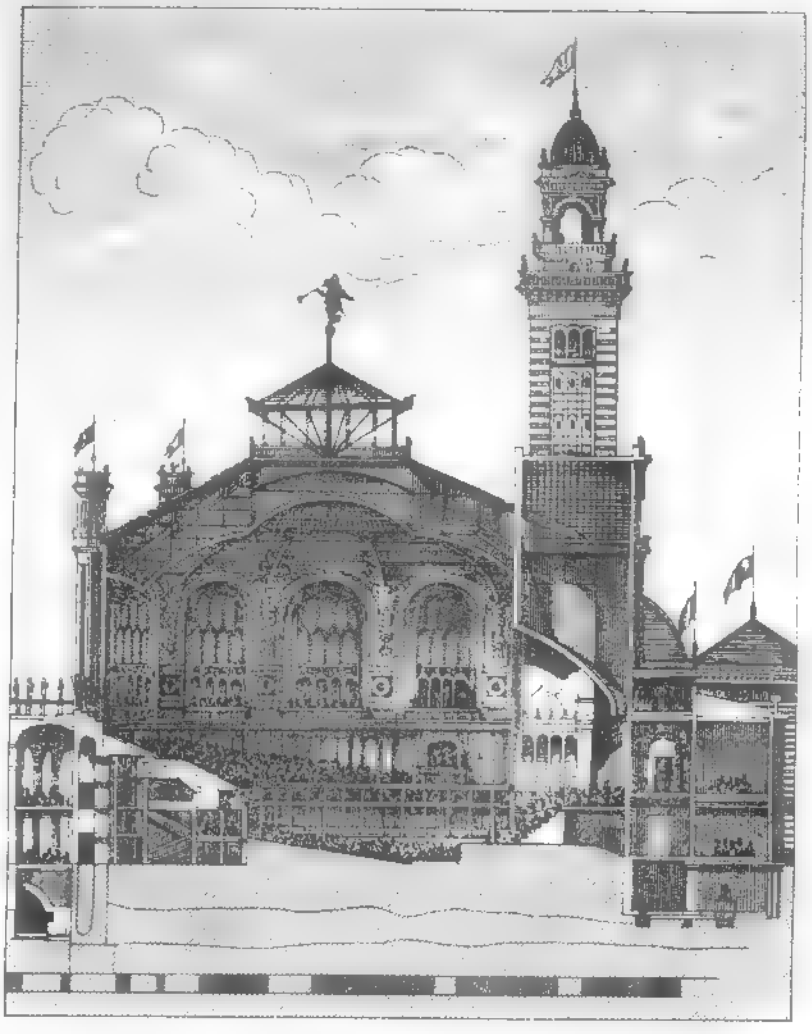


Fig. 43.

in tale circostanza impiegata, sia stato notevolmente diminuito dalla decorazione sovra essa dipinta. Infatti la facoltà che hanno le stoffe di assorbire il suono, deriva, come a suo luogo abbiamo mostrato,

dalla loro mollezza, la quale rimane notevolmente diminuita per la sovrapposizione di pitture e di vernici.

Le due cause alle quali abbiamo finora accennato possono quindi riguardarsi come passaggiere ed ancora come suscettibili di venir modificate, ma studiando la forma della sala e della vôlta che la ricopre colla scorta dei principi d'acustica pratica che noi siamo venuti esponendo, ci pare di riscontrare una terza causa di errore, quasi diremmo organico, e che consiste nella forma data alla vôlta della sala: in quel cupolino infatti e nelle forti strombature delle ampie finestre noi ravvisiamo delle masse d'aria le quali, vibrando di vibrazioni loro proprie, ci sembrano ben capaci di produrre da sole buona parte dell'inconveniente avvertito, e se ciò è, come noi intimamente crediamo, non potrà sperarsi di avere completamente allontanate le cause di insuccesso finchè non vi si sarà recato radicale rimedio.

Inoltre non deve nascondersi che reca non lieve sorpresa il vedere come dopo aver prese tante precauzioni per ovviare alla formazione dell'eco sulle pareti della sala, siensi completamente trascurate quelle immense vetriate, non facendosi alcun carico della riflessione che sopra di esse deve necessariamente avvenire.

Molte e molte altre cose vorremmo e potremmo dire intorno alle condizioni acustiche di questa sala, ed in particolare sugli effetti della « conca acustica », e sopra alcune modificazioni che a norma dei principi stabiliti potrebbero ad essa recarsi; ma da un lato, non essendosi pubblicato alcun disegno particolareggiato di essa, nè avendolo noi potuto ottenere dagli architetti, che intendono pubblicarlo per i primi in un lavoro del quale si annunzia prossima la pubblicazione, non crediamo di poter entrare in ulteriori particolari a questo proposito, poichè non ci è concesso di appoggiare le nostre argomentazioni che sopra le illustrazioni contenute nella pubblicazione già citata, e dalla quale abbiamo desunti alcuni particolari per noi più interessanti nella nostra figura 43.

AVVERTENZE GENERALI E CONCLUSIONI

Abbiamo già ripetutamente messo in evidenza che l'applicazione dei principi di acustica non avrebbe dovuto riferirsi sempre alle più opportune disposizioni da darsi a nuovi edifizi, ma altresì a tentare di portare un qualche rimedio ai difetti esistenti, ed in tal caso naturalmente le prime indagini dovranno avere per iscopo l'accertamento della esistenza, della natura e della estensione di tali difetti.

Nel formarsi una opinione intorno al successo od all'insuccesso di un edifizio nei riguardi acustici, la guida più sicura consisterà in una relazione data da persone le quali abbiano l'abitudine di parlare o di cantare in esso.

Fra un grande uditorio, anche in un ambiente difettoso vi possono essere molti e talvolta moltissimi astanti i quali udranno perfettamente; e conversando con varie persone, specialmente se, per la particolare destinazione dell'edifizio, abbiano la consuetudine di occupare costantemente il medesimo posto, l'architetto potrà giungere a raccogliere le osservazioni di persone che, occupando i migliori posti, si troveranno in ottime condizioni acustiche, come pure quelle di altre persone che si troveranno nel caso contrario.

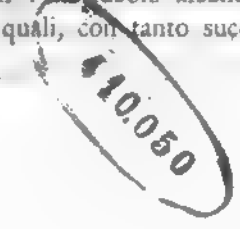
Ed ancora in molti edifizi, che abbiano, come si direbbe, un difetto organico, ma non gravissimo, sarà pur sempre possibile ad un oratore o ad un cantante il farsi udire perfino negli angoli più reposti, ma ciò non senza sforzi straordinari della voce. Questo fatto non può essere apprezzato al suo giusto valore dai frequentatori di

un dato luogo fino a che non ne sieno resi edotti o dal caso di mancanza di voce del consueto oratore, o dalla loro incapacità di udire perfettamente le parole di un qualche nuovo oratore, il quale non abbia la medesima potenza di voce o la stessa abilità.

Finalmente, per quanto si riferisce alla musica, si può affermare con tutta asseveranza che sono relativamente pochissime le persone capaci di distinguere un ambiente buono ai riguardi musicali da uno cattivo, o come suol dirsi, più o meno propriamente, un ambiente sonoro da uno sordo. E quantunque per un orecchio delicato e bene educato al gusto musicale, il diletto della musica si perda, quando questa venga eseguita in un ambiente rumoroso o sordo, appena una volta su dieci un profano sarà in caso di accusare difetti nell'ambiente, e seppure egli avvertirà il fatto che in altre occasioni l'esecuzione della medesima musica gli piacque maggiormente, sarà piuttosto indotto ad attribuirlo ad una diversità di esecuzione, che non ad un difetto dell'ambiente.

A nessuna di queste cause d'errore va soggetto un predicatore, un oratore, un attore od un cantante: egli sente benissimo se realmente riesce a riempiere della sua voce un ambiente, e se in ciò fare gli è d'uopo esercitare uno sforzo straordinario, e seppure a motivo della soverchia vastità dell'ambiente egli non avverte dapprima difficoltà alcuna derivante da questa causa, tosto egli si accorgerà della fatica che deve durare. Quando un oratore prova difficoltà materiale nel parlare è *certo* che alcuni almeno dei suoi uditori l'odono con difficoltà. Forse potrà avvenire che si formi nell'ambiente un'eco avvertito dall'uditorio e non dall'oratore; ma questo ad ogni modo non avviene che in casi estremamente rari.

La difficoltà capitale insomma nelle questioni di acustica applicata, allorquando si tratti di portare un qualche rimedio in edifizi già costruiti, consiste nella diagnosi: nella acustica, come in altri rami dello scibile, si conoscono perfettamente gli espedienti coi quali si può recare il rimedio, ma il grave scoglio da superare sta appunto nel chiarire quale sia il genere del male che si vuol curare, dove sia la sede principale e fino a qual punto si estenda. Il motivo di tale difficoltà si è che in tutte le indagini le quali hanno per iscopo di fissare gli elementi della diagnosi, noi dobbiamo ricorrere ai nostri sensi pur troppo imperfettissimi, e quello che forse vale ancor più, affatto inesperti della materia, per la mancanza di un opportuno esercizio. Per noi non v'ha dubbio alcuno che, se taluno di quei fortunatissimi scienziati i quali, con tanto successo, s'applicarono ad altri rami della



fisica, arricchendola di portentose invenzioni e di ammirabili apparecchi, avesse rivolta la sua attenzione alla acustica degli edifizi, noi possederemmo già uno strumento di ascoltazione che, portato nei vari punti di un ambiente, ci direbbe con tutta esattezza quali ne sieno le condizioni acustiche (1). Io non esito ad affermarlo: chi inventerà questo ascoltatore, risolverà ad un tempo ed in modo sicuro tutte le questioni di acustica pratica, poichè dopo una serie di osservazioni istituite con tale strumento, essa diverrà un ramo di scienza altrettanto sicura nelle sue applicazioni, quanto oggidì lo è l'ottica.

Fintantochè però di tale invenzione non si arricchisca la scienza, dovremo accontentarci di procedere un po' a tentoni, pur seguendo, per quanto è possibile, il metodo sperimentale.

Così, nei tentativi diretti a togliere difetti in edifizi già esistenti sarà spesso necessario di procedere per via di esperienza e la cognizione delle leggi di acustica non basterà da sola a suggerire con sicurezza all'architetto il rimedio di effetto certo, ma piuttosto servirà a suggeritgli quali sono gli espedienti che potranno essere tentati con maggiore probabilità di buon esito, e per additare il modo nel quale il rimedio da tentarsi dovrà essere applicato.

Nella erezione di nuovi edifizi sembra che possa procedersi con maggiore sicurezza, non già però tanto che la perfetta conoscenza delle leggi e dei principi di acustica possano dispensare l'architetto dal procedere con ogni cautela e dal cercare ogni modo per acquistare una certa somma di esperienza collo studio di edifizi già esistenti.

Ma non è soltanto secondo questo indirizzo che il metodo sperimentale può essere seguito. Il sistema dei tentativi sperimentali in via di esecuzione del lavoro, più o meno razionalmente adottato, come vedemmo poco fa, dagli architetti del Trocadero, era stato caldamente raccomandato da Leone Foucault, or sono più di trenta anni (2). La proposta così efficacemente avanzata dal Lachez di

(1) Mentre il presente lavoro era in corso di stampa vennero alla luce le *Researches in Sound* dell' HENRY, delle quali abbiamo potuto fare ripetuta menzione in alcune note precedenti. In queste ricerche scrive l'HENRY d'essersi servito di un « orecchio artificiale » del quale porge anche una particolareggiata descrizione. Non possiamo però dire se un tale istrumento, che si assicura abbia prestato ottimi servigi negli esperimenti fatti riferibilmente ai segnali acustici per uso della marina, ridotto nelle sue proporzioni, ed opportunamente modificato, potrebbe servire allo scopo al quale accenniamo nel testo, essendoci mancato il tempo d'istituire qualsiasi esperimento a tale riguardo.

(2) Nel *Journal des Débats politiques et littéraires* del 13 febbraio 184.

tentare una costruzione sperimentale, allo scopo di verificarvi i vari principi di acustica applicata, condurrebbe senza dubbio a risultati importantissimi, ma essa appartiene alla categoria di quelle che un privato non può mandare ad effetto. Questo sarebbe realmente un campo di esperienza assai utile per le applicazioni; tutte le esperienze da gabinetto non farebbero progredire di una linea una sola delle questioni di acustica pratica, che abbiamo sollevate e dibattute.

Se pertanto esistono certi principi generali, e se certe qualità di un edifizio, o talune circostanze ad esso relative, possono essere guida al successo, ed altre ordinariamente, o fors'anco invariabilmente, sono accompagnate da insuccesso, non deve sembrare strano l'aggiungere che noi facciamo in via di conclusione, che cioè: ogni architetto nell'adattare al suo progetto quelle proporzioni, quei materiali e quelle disposizioni che per prova si sa essere di vantaggio e nello escludere quelle altre che l'esperienza dimostra dannose, potrà per lo meno ripromettersi fin da principio con fondamento che l'edifizio che egli si accinge a costruire soddisfi nel miglior modo possibile alle esigenze della acustica.

Il problema, noi lo abbiamo ripetutamente messo in evidenza, è complesso, ma perciò appunto non bisogna rimettersene al caso, nè aspettare da ispirazioni fantastiche una soluzione pratica e certa.

INDICE

Parte Prima.

Introduzione Teorica.

§ I. Generalità . . . . . Pag. 3
§ II. Veicoli del suono . . . . . » 4
§ III. Propagazione del suono, riflessione, rifrazione, inflessione, condotta ed assorbimento . . . » 8
§ IV. Intensità, tuono, tempera. . . . . » 22
§ V. Vibrazioni simpatiche . . . . . » 25
§ VI. Interferenze . . . . . » 26
§ VII. Portata dei suoni . . . . . » 28

Parte Seconda.

Le leggi di acustica nella pratica.

Preliminari. Della propagazione del suono all'aria aperta e nei luoghi chiusi . . . . . Pag. 33
Cap. I. Degli ostacoli che si oppongono alla uniforme propagazione ed alla distinta percezione dei suoni . . . » 38
§ I. Generalità . . . . . » ivi
§ II. Affievolimento ed assorbimento del suono. Impedimenti materiali alla sua propagazione . . . » 40
§ III. Degli ostacoli che alla uniforme diffusione e distinta percezione dei suoni possono derivare dalla disposizione dell'uditorio . . . . . » 44
§ IV. Eccesso di risonanza . . . . . » 55
§ V. Eco . . . . . » 57

Cap. I. Dei mezzi coi quali può venirsi in aiuto alla uniforme diffusione ed alla distinta percezione dei suoni . Pag.
§ I. Generalità . . . . . »
§ II. Della riflessione . . . . . »
§ III. Direzione e condotta del suono . . . . . »
§ IV. Della risonanza degli ambienti. . . . . »
§ V. Proporzioni di un ambiente più opportune per soddisfare alle esigenze di una buona audizione . »

Parte Terza.

Applicazioni.

§ I. Classificazione degli edifizi sotto il punto di vista delle condizioni acustiche . . . . . Pag
Cap. I. Edifizi nei quali la voce od i suoni si diffondono totalmente o precipuamente per effetto di naturale radiazione »
§ I. Teatri antichi dei Greci e dei Romani . . . »
§ II. Teatri moderni . . . . . »
§ III. Aule parlamentari . . . . . »
§ IV. Anfiteatri per il pubblico insegnamento . . . »
§ V. Corti d'Assise . . . . . »
Cap. II. Edifizi nei quali la voce od i suoni vengono diretti o condotti »
§ I. Chiese . . . . . »
§ II. Sale per pubbliche radunanze, concerti, ecc. . . »
Avvertenze generali e conclusioni . . . . . »

410.050

TIP. E LIT.ª *CAMILLA* E *BERTOLERO* — EDITORI
Torino — Via Ospedale, 18 — Torino

IN CORSO DI STAMPA:

MANUALE LEGALE

DEGLI

INGEGNERI ED ARCHITETTI

OVVERO LA LEGGE

SULLE OPERE PUBBLICHE

illustrata

con riferimento ai Codici, alle Leggi ed ai Decreti in materie affini

(Polizia delle Acque e Strade, Boschi e Foreste, Pesca fluviale e lacuale, Espropriazioni, Strade obbligatorie, Consorzi d'irrigazione ed opere idrauliche, Miniere, Cave ed Usine, Strade ferrate, Tramways, Telegrafi, ecc.),

coll'aggiunta di Circolari, Istruzioni, Moduli e Norme pratiche direttive.

OPERA COMPILATA

AD USO

degli Ingegneri, degli Architetti, dei Periti, dei Geometri, degli Uffici Comunali e Provinciali, delle Prefetture, delle Sotto-Prefetture, ecc.

DAL

Prof. FRANCESCO BUFALINI

L'opera formerà un volume di circa 35 fogli di stampa, di 16 pagine ciascuno, in-8° grande, e così di complessive pagine 560 circa, e si distribuisce a dispense di cinque fogli cadauna a misura che si pubblicano, od a volume ultimato, secondo ne manifestano il desiderio gli Associati. A chi la riceve a dispense sarà spedita, coll'ultima, la coperta del volume.

Torino, aprile 1882.

PREZZO LIRE DODICI.

TIP. E LIT. CAMILLA E BERTOLERO — EDITORI
Torino — Via Ospedale, 18 — Torino

ANNO VIII

L'INGEGNERIA CIVILE

1882

E LE ARTI INDUSTRIALI

Periodico Tecnico Mensile

DIRETTO DALL'INGEGNERE

GIOVANNI SACHERI

con un'eletta d'Ingegneri e Industriali italiani e stranieri.

Il periodico si pubblica il 1° d'ogni mese, e consta di un fascicolo di 16 pagine a due colonne in-4° grande; con incisioni nel testo, tavole litografate a parte e coperta.

Il prezzo annuo d'abbonamento è di L. 12 per l'Italia e di L. 15 per l'estero

Sono ancor disponibili poche copie dei primi 7 volumi (annate 1875 a 1881) al prezzo di L. 13 cad.

LE

COSTRUZIONI MODERNE

DI TUTTE LE NAZIONI

all'Esposizione Universale di Parigi del 1878

STUDIO CRITICO COMPARATIVO

dell'Ing. GIOVANNI SACHERI

Un volume di 24 fogli di testo in-4° grande con 5o tavole litografate, e numerose incisioni nel testo.

Prezzo L. 30.

CORNICI

DI

TERRACOTTA

IN BOLOGNA

Rilevate e disegnate dall'Architetto

MARCO PAGAN DE' PAGANIS

Sono 16 grandi tavole su carta forte (formato cent. 28×40) in cromolitografia, con prefazione e coperta.

Prezzo dell'opera: L. 12.

IN CORSO DI STAMPA:

LE MACCHINE A VAPORE

IL MATERIALE E L'ESERCIZIO TECNICO DELLE STRADE FERRATE

PER L'ING. COMM.

AGOSTINO CAVALLERO

Professore di macchine termodinamiche e ferrovie alla Scuola d'Applicazione pegli Ingegneri e Preside dell'Istituto Tecnico di Torino

AD USO

degli Ingegneri civili, industriali, navali e delle ferrovie, degli Allievi delle Scuole di Applicazione per gli Ingegneri

UTILE ANCHE

agli Allievi degli Istituti Tecnici e delle Scuole professionali d'Arti e Mestieri.